

THÈSES

PRÉSENTÉES

À LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

MAURICE LUCAS

1^{re} THÈSE : Contribution à l'étude du retrait des ciments.

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 21 AVR 1937 devant la Commission d'examen :

MM. BEGHIN *Président*;

VILLEY

PERÈS

} *Examineurs.*

PARIS

IMPRIMERIE NATIONALE

1937

THÈSES

PRÉSENTÉES

À LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR DOCTEUR

PAR

MAURICE LUCAS

1^{re} THÈSE : Contribution à l'étude du retrait des ciments.

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 21 AVR 1937 devant la Commission d'examen :

MM. BEGHIN *Président*;

VILLEY }
PERES } *Examineurs*.

PARIS

IMPRIMERIE NATIONALE

1937

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS.

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.

Doyen..... C. MAURAIN, professeur, Physique du Globe.

Professeurs honoraires..... { H. LEBESQUE, A. FERNBACH, A. LEDUC, EMILE PICARD,
RÉMY PERRIER, LÉON BRILLOUIN, GUILLET, PÉCHARD,
FREUNDLER, AUGER, BLAISE, DANGEARD, LESPIEAU,
MARÇHIS, VESSIOT, PORTIER.

Professeurs.

G. BERTRAND.....	T Chimie biologique.	L. JOLEAUD.....	Paléontologie.
M. CAULLERY.....	T Zoologie. (Évolution des êtres organisés.)	ROBERT-LÉVY. ...	T Physiologie comparée.
ÉMILE BOREL.....	T Calcul des probabilités et physique mathématique.	HENRI VILLAT.....	T Mécanique des fluides et applications.
JEAN PERRIN.....	T Chimie physique.	CH. JACOB.....	T Géologie.
H. ABRAHAM.....	T Physique.	P. PASCAL.....	T Chimie minérale.
E. CARTAN.....	T Géométrie supérieure.	M. FRÉCHET.....	T Calcul différentiel et calcul intégral.
M. MOLLIARD.....	T Physiologie végétale.	E. ESCLANGON.....	T Astronomie.
L. LAPICQUE.....	T Physiologie générale.	M ^{me} RAMART-LUCAS.	T Chimie organique.
A. COTTON.....	T Recherches physiques.	H. BÉGHIN.....	T Mécanique physique et expérimentale.
J. DRACH.....	T Analyse supérieure et algèbre supérieure.	FOCH.....	Mécanique expérimentale des fluides.
CHARLES FABRY....	T Enseignement de physique.	PAUTHENIER.....	Physique (P. C. B.).
CHARLES PÉREZ....	T Zoologie.	DE BROGLIE.....	T Théories physiques.
LÉON BERTRAND...	T Géologie structurale et géologie appliquée.	CHRETIEN.....	Optique appliquée.
E. RABAUD.....	T Biologie expérimentale.	P. JOB.....	Chimie générale.
M. GUICHARD.....	Chimie minérale.	LABROUSTE.....	Physique du Globe.
PAUL MONTEL.....	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	PRENANT.....	Zoologie.
P. WINTREBERT...	T Anatomie et histologie comparées.	VILLEY.....	Mécanique physique et expérimentale.
L. BLARINGHEM...	T Botanique.	BOHN.....	Zoologie (P. C. B.).
O. DUBOSQ.....	T Biologie maritime.	COMBES.....	Botanique (P. C. B.).
G. JULIA.....	T Mécanique analytique et mécanique céleste.	GARNIER.....	T Mathématiques générales.
C. MAUGUIN.....	T Minéralogie.	PÈRÈS.....	Mécanique théorique des fluides.
A. MICHEL-LÉVY...	T Pétrographie.	HACKSPILL.....	Chimie (P. C. B.).
H. BÉNARD.....	T Mécanique expérimentale des fluides.	LAUGIER.....	Physiologie générale.
A. DENJOY.....	T Application de l'analyse à la Géométrie.	TOUSSAINT.....	Technique Aéronautique.
L. LUTAUD.....	T Géographie physique et géologie dynamique.	M. CURIE.....	Physique (P. C. B.).
EUGÈNE BLOCH....	T Physique théorique et physique céleste.	G. RIBAUD.....	T Hautes températures.
G. BRUHAT.....	Physique.	CHAZL.....	T Mécanique rationnelle.
E. DARMOIS.....	Enseignement de physique.	GAULT.....	Chimie (P. C. B.).
A. DEBIERNE.....	T Physique générale et radio-activité.	CROZE.....	Recherche Physiques.
A. DUFOUR.....	T Physique (P. C. B.).	DUPONT.....	T Théories chimiques.
L. DUNOYER.....	Optique appliquée.	LANQUINE.....	Géologie.
A. GUILLIERMOND.	T Botanique.	VALIRON.....	Mathématiques générales.
M. JAVILLIER....	Chimie biologique.	BARRABÉ.....	Géologie structurale et géologie appliquée.
		MILLOT.....	Zoologie (P. C. B.).
		F. PERRIN.....	Théories physiques.
		VAVON.....	Chimie organique.
		G. DARMOIS.....	Calcul des probabilités et Physique. Mathématique.

Secrétaire..... A. PACAUD.

Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.



À LA MÉMOIRE DE MON PÈRE.

PREMIÈRE THÈSE

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU RETRAIT DES CIMENTS.

INTRODUCTION.

On appelle retrait la diminution de volume éprouvée par un corps.

Dans le cas des liants hydrauliques, ce mot s'applique spécialement à la diminution de volume apparent obtenue en exposant le liant à l'air sec après sa prise. Il est employé indifféremment pour indiquer une variation de volume ou une variation de longueur. Le retrait ayant une valeur très faible, on peut admettre que la première est le triple de la seconde.

Le phénomène n'est point particulier aux liants, on le retrouve, avec des ordres de grandeur différents, chez certains matériaux tels que les pierres (calcaires, grès basalte, granits), les produits céramiques, les tissus organiques et chez tous les gels colloïdaux, de telle sorte qu'on l'a parfois considéré comme associé à la structure colloïdale.

[CONTRIBUTION

A L'ÉTUDE DU RETRAIT DES CIMENTS,

par M. Maurice LUCAS,

Attaché au Laboratoire des Ponts et Chaussées.

HISTORIQUE SOMMAIRE.

Le phénomène de retrait a été constaté depuis l'apparition des liants hydrauliques. L'étude en a été entreprise au siècle dernier. Voici quelles étaient, vers 1900 les conclusions de A. CONSIDÈRE :

a. Les ciments purs conservés dans l'eau s'allongent d'environ 2 millimètres par mètre, tandis que ceux conservés à l'air libre se raccourcissent sensiblement de la même quantité;

b. Le phénomène se retrouve chez les mortiers et les bétons, mais l'amplitude de ces variations décroît avec le dosage en ciment. Pour les mortiers à 600 kilogrammes de ciment par mètre cube elle est le $\frac{1}{3}$ de celle du ciment pur;

c. L'amplitude décroît également quand on introduit des armatures métalliques dans le béton, un pourcentage d'acier de 5,8 p. 100 la fait tomber au $\frac{1}{4}$ ou au $\frac{1}{5}$ de sa valeur.

Depuis cette époque et jusqu'à ces dernières années, le phénomène paraît avoir été peu étudié, probablement parce qu'il n'avait guère d'inconvénients dans les constructions réalisées.

Il n'en est plus de même pour deux raisons, d'une part le domaine d'application des liants s'est agrandi, d'autre part les efforts faits pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques ont conduit à la fabrication de ciments très énergiques pour lesquels les efforts du retrait se trouvent notablement accusés. Aussi l'étude du retrait a-t-elle pris partout une certaine ampleur. Voici les conclusions auxquelles elle conduit :

1° Tandis qu'en milieu humide le ciment par suite des modifications dont il est le siège s'allonge légèrement, en milieu sec il se produit un phénomène secondaire : le départ d'une partie de l'eau du ciment qui provoque un retrait supérieur à l'allongement.

2° Le retrait dépend de la nature du liant et de son état : il augmente avec la finesse de mouture.

3° Il dépend des conditions de gâchage et de mise en œuvre, il augmente avec le dosage en ciment, le dosage en eau, la quantité et la nature des sels ajoutés au ciment ou à l'eau.

Il décroît avec l'augmentation des armatures dans le béton armé.

4° Le retrait dépend enfin des conditions de conservation. Il est d'autant plus grand que l'hygrométrie de l'air est faible et même varie dans le temps suivant les valeurs de l'hygrométrie.

Il décroît beaucoup quand les dimensions de la pièce augmentent, parceque les couches internes n'arrivent pas à se mettre en équilibre avec l'extérieur. Au centre des grandes masses en béton telles que les barrages, il peut être très faible (M. COYNE).

Il augmente avec la température.

Il est considérablement accru dans une atmosphère de gaz carbonique.

*
**

Dernièrement M. E. FREYSSINET, après diverses études expérimentales, a proposé une synthèse générale de l'étude du retrait en ce qui concerne les pâtes, les liants, les colloïdes, plus généralement les corps formés de grains fins et d'eau qu'il appelle les pseudo-solides.

Il attribue les propriétés spéciales de ces corps à leur structure : corpuscules séparés par des films d'eau extrêmement minces, et retrouve, par cette théorie, un certain nombre de résultats expérimentaux non expliqués.

En particulier le retrait serait dû aux actions de surface de l'eau qui forme des ménisques dont le rayon est conditionné par l'hygrométrie de l'air suivant la théorie de LAPLACE. Plus

l'hygrométrie est faible, plus le rayon de courbure des ménisques est faible, plus l'action de surface et le retrait qui en résulte sont grands. Le retrait serait donc une déformation due à une contrainte triple résultant de l'hygrométrie extérieure.

*
**

Dans ce qui suit j'ai étudié l'influence de l'hygrométrie, d'une part sur le développement du retrait, d'autre part sur la valeur finale de ce retrait et j'ai cherché à établir les relations existant entre le retrait et le durcissement.

Parallèlement au retrait, j'ai étudié l'influence de l'hygrométrie et du durcissement sur la quantité d'eau retenue par le ciment.

J'ai enfin abordé l'étude des contraintes mécaniques développées par le retrait dans les cas les plus simples.

Une première difficulté de l'étude réside dans la longueur des expériences résultant de la lenteur des phénomènes. Une seconde provient du fait que le ciment n'est jamais un composé défini et qu'à aucun moment on ne se trouve en présence de phénomènes nets, réguliers, précis.

MÉTHODE ET INSTRUMENTS DE MESURE.

Toute l'étude du retrait repose sur la mesure des variations de longueur. On peut concevoir deux catégories de procédés, basés, le premier sur l'emploi d'un appareil unique permettant de mesurer un nombre illimité d'éprouvettes, le second sur l'emploi d'un appareil fixé à demeure sur chaque éprouvette.

1° Appareils uniques permettant d'effectuer un grand nombre de mesures.

La précision des mesures est, dans ce cas, limitée plutôt par la fidélité de la mise en place de l'éprouvette que par la précision des lectures. Mais on peut utiliser un appareil très important et très perfectionné.

Les appareils les meilleurs au point de vue théorique sont les appareils à visés qui ne nécessitent aucune action sur la pièce. J'ai utilisé un micromètre représenté par la figure 1. Il comportait deux microscopes de grossissement 25 munis chacun d'un réticule à vis micrométrique permettant d'apprécier le $1/200$ de millimètre. L'écartement des microscopes se mesurait par visées sur une règle d'Invar.

Il est nécessaire d'avoir deux repères sur la pièce à mesurer. J'ai utilisé d'abord des plots de cuivre polis puis des billes d'acier inoxydable encastrées dans le ciment à mi-hauteur, et sur lesquels je traçais des croix le plus finement possible. J'ai utilisé généralement le dernier système. La précision de la mesure variait de $1/200$ à $1/100$ de millimètre suivant la finesse des repères. La durée moyenne d'une mesure était de l'ordre de une minute.

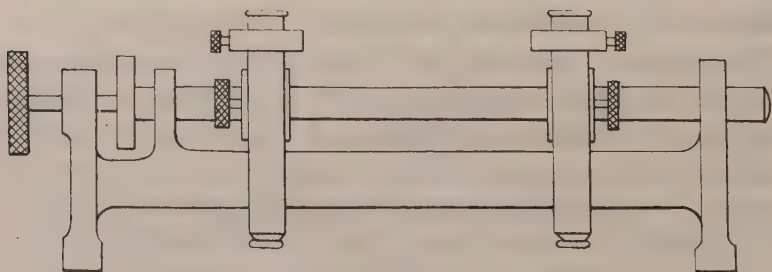


Fig. 1. — Comparateur à deux microscopes.

Pour mesurer le retrait des plaques utilisées dans les mesures photoélasticimétriques, j'ai employé un appareil à contact comportant, d'un côté une butée pour l'éprouvette, de l'autre une vis micrométrique au $1/100$. L'éprouvette elle-même portait deux plots de cuivre du côté de la butée et un du côté de la vis. L'opération de mesure était rapide (durée moyenne 30 secondes), mais la précision assez faible : $1/50$ de millimètre pour des plaques de 33 centimètres. De plus, il existe, avec un tel appareil une cause d'erreur due à la flexion plus ou moins grande prise par les éprouvettes au cours du durcissement et qui déplace les points de contact.

Par la suite, j'ai réalisé un autre appareil à contact extrêmement simple et très précis qui a remplacé tous les autres.

Il se compose d'un comparateur ou amplificateur à cadran dont le palpeur est prolongé par une tige d'Invar, et portant deux tenons à évidement cupulaire fixés, l'un sur la tige, l'autre sur le boîtier du comparateur (fig. 2). On encastre deux billes d'acier inoxydable dans la pièce à mesurer; sur chacune on pose un des tenons, dont la position se trouve exactement déterminée grâce à la parfaite sphéricité de la bille. La distance des tenons est lue directement sur le comparateur.

La durée d'une mesure est ramenée à 15 secondes, la précision est du $1/200$ de millimètre, précision limitée seulement par la flexion de la tige. Avec un appareil réalisé spécialement, comportant un logement plus long pour le palpeur, on obtiendrait vraisemblablement le micron.

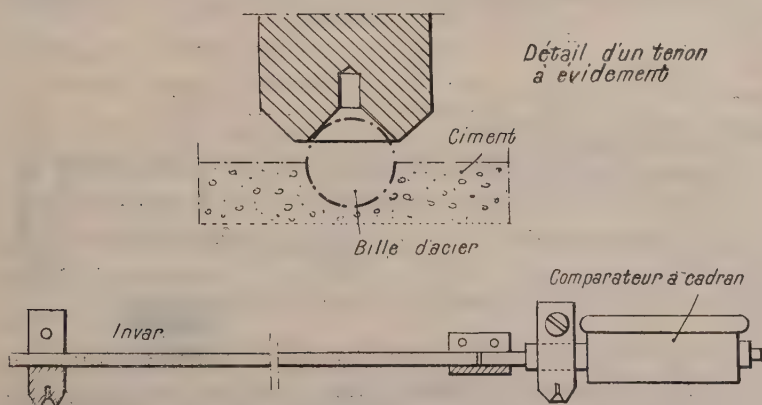


Fig. 2. — Appareil de mesure par contact.

Les comparateurs à cadran m'ont d'ailleurs servi de base pour presque tous les autres appareils, par exemple dans la mesure de la variation de longueur des armatures tubulaires et des prismes de ciment (p. 63). J'utilisais dans ce dernier cas le dispositif représenté par la figure 36. Pour faire une lecture on introduit le comparateur dans la tubulure. Là encore, la précision de la mesure dépend de la réalisation des surfaces de contact. Par un bon usinage on obtient le $1/100$ de millimètre.

Avec un nombre de comparateurs suffisant pour qu'on puisse en fixer un sur chaque éprouvette, la précision ne dépend plus que de la sensibilité de l'instrument : on obtient le 1/500 de millimètre.

2° Mesures précises et continues de quelques éprouvettes.

Pour obtenir une précision du 1/500 au 1/1.000 de millimètre, et surtout pour réaliser une mesure continue, j'ai employé des comparateurs fixés à demeure sur chaque éprouvette.

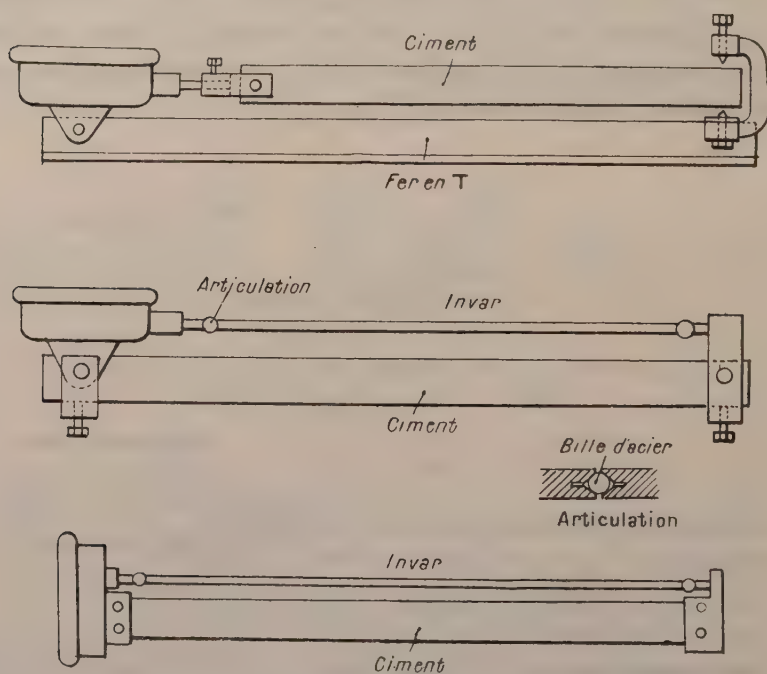


Fig. 3. — Comparateurs à cadran fixe à demeure sur les éprouvettes.

Tel est l'appareil utilisé pour mesurer les variations de longueur du ciment en fonction de l'hygrométrie. Un fer en T porte un comparateur à une extrémité, on place l'éprouvette entre des pivots fixés, les premiers à l'autre extrémité du fer, les seconds à la partie mobile du comparateur (fig. 3).

Pour diminuer l'encombrement en longueur, on peut fixer directement le comparateur sur la barre de ciment. Le fer en T est remplacé par une petite barre d'acier ordinaire ou d'Invar reliant la partie mobile du comparateur à l'extrémité de l'éprouvette. Ce montage est plus délicat. Il nécessite deux articulations à rotule. J'ai utilisé dans ce but des billes d'acier placées entre deux tiges dont les centres étaient évidés (fig. 3).

I. INFLUENCE DE L'HYGROMÉTRIE SUR LE DÉVELOPPEMENT DU RETRAIT DU CIMENT.

On sait aujourd'hui qu'il y a un rapport entre la variation du retrait et la variation de la quantité d'eau incluse dans le ciment, celle-ci tendant continuellement à se mettre en équilibre avec l'eau de l'atmosphère. Le retrait serait ainsi conditionné par l'hygrométrie de l'air extérieur, hypothèse qui m'a fourni la base d'une première série d'expériences.

On réalise commodément un état hygrométrique donné, dans un exsiccateur au moyen d'un mélange d'acide sulfurique et d'eau. La correspondance entre la concentration de l'acide et la tension de vapeur a été établie par REGNAULT (1845) pour diverses concentrations et pour diverses températures.

En divisant les nombres de REGNAULT par les tensions maxima de vapeur, on obtient le tableau des états hygrométriques. Les valeurs trouvées varient très peu en fonction de la température, les exsiccateurs présenteront donc l'avantage d'être insensibles à ses légères variations (tableau de la fig. 4).

Toutefois, comme la température a une influence sur le vieillissement du ciment et la vitesse de réalisation des équilibres, les expériences suivantes ont été effectuées dans une pièce maintenue électriquement à 20°.

A l'aide du tableau 4 on trace pour cette température la courbe de variation de l'état hygrométrique en fonction de la

États hygrométriques obtenus avec des mélanges d'acide sulfurique et d'eau, d'après REGNAULT.

TEMPÉ- TURE.	TENSIONS MAXIMA de vapeur d'eau.	CONCENTRATION ET DENSITÉ DU MÉLANGE.								
		$\tau = 0,8448$ $d = 1,779$	$\tau = 0,7313$ $d = 1,652$	$\tau = 0,6447$ $d = 1,559$	$\tau = 0,5765$ $d = 1,477$	$\tau = 0,5213$ $d = 1,420$	$\tau = 0,4375$ $d = 1,340$	$\tau = 0,3769$ $d = 1,286$	$\tau = 0,3310$ $d = 1,248$	$\tau = 0,2426$ $d = 1,176$
5°	0,654	1,606	5,918	13,17	19,80	32,7	48,50	63,0	67,7	83,8
6°	0,701	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8°	0,804	1,36	5,62	13,10	20,25	32,60	48,51	62,95	69,2	83,9
10°	0,921	"	"	"	"	"	"	"	"	"
12°	1,051	1,15	5,29	12,97	20,68	32,95	48,50	62,6	70,1	83,6
14°	1,198	"	"	"	"	"	"	"	"	"
16°	1,363	0,99	5,04	12,85	20,98	32,95	48,4	62,1	70,35	83,1
18°	1,546	0,93	4,95	12,82	21,15	33,02	48,45	61,9	70,4	82,9
20°	1,751	0,88	4,87	12,80	21,28	33,05	48,50	62,0	70,5	82,9
22°	1,979	0,83	4,81	12,77	21,42	33,15	48,58	61,8	70,3	82,5
24°	2,232	0,79	4,76	12,76	21,58	33,5	48,7	61,7	70,2	82,5
26°	2,513	"	"	"	"	"	"	"	"	"
28°	2,825	0,73	4,72	12,79	21,94	33,5	49,1	61,7	70	82,3
30°	3,111	"	"	"	"	"	"	"	"	"
32°	3,553	0,69	4,70	12,75	22,15	33,9	49,6	61,9	69,8	82,5
34°	3,975	"	"	"	"	"	"	"	"	"
36°	4,202	0,66	4,71	12,92	22,65	34,2	50,1	62,2	69,8	82,7

Fig. 4.

densité de l'acide sulfurique. Cette courbe m'a servi de base dans toutes les mesures qui suivent (fig. 5).

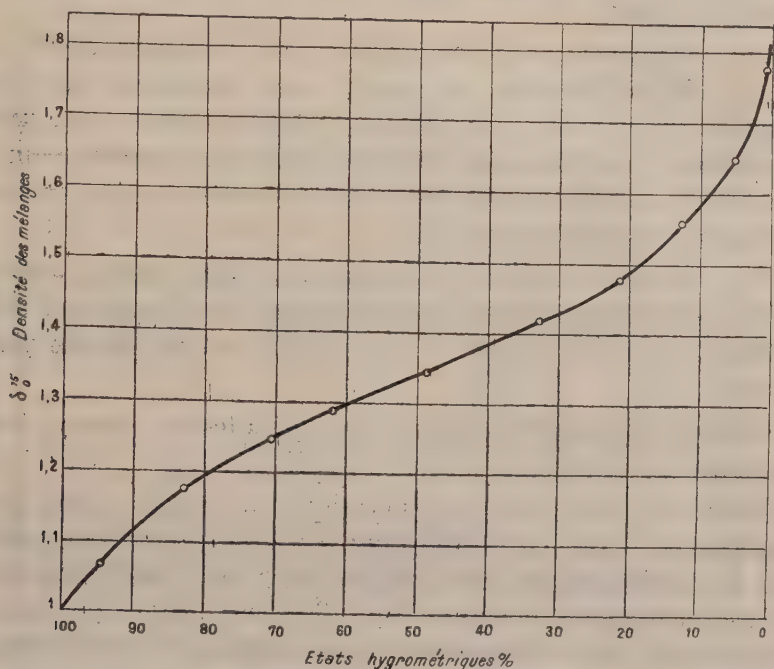


Fig. 5. — États hygrométriques réalisés au moyen de mélanges d'acide sulfurique et d'eau.

Comme exsiccateurs j'emploie des flacons de verre, bouchés à l'émeri, couchés horizontalement (fig. 6). A l'intérieur un peu au-dessous de l'axe, je place transversalement deux lamelle de verre collées aux parois avec un peu de cire.

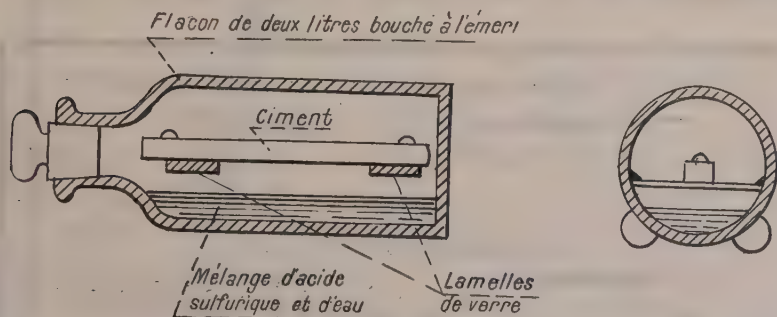


Fig. 6. — Exsiccateur à hygrométrie définie.

Elles servent de support à l'éprouvette de ciment. Le mélange acide-eau est introduit directement dans le flacon par un entonnoir coudé.

Les éprouvettes sont des baguettes prismatiques de $12 \times 12 \times 200$ millimètres, en ciment pur, gâché suivant les procédés normalisés à consistance plastique. *Elles sont uniformément moulées entre des règles de fer formant moule étanche démoulées après vingt-quatre heures et mises immédiatement en observation.*

Elles portent à chaque extrémité des billes d'acier inoxydable servant de repères pour la mesure des longueurs soit à l'appareil à visées, soit à l'appareil à contact décrits plus haut.

On pèse les baguettes sur une balance à lecture directe, très amortie.

Avec ces appareils, les opérations de mesure sont très rapides. Le temps nécessaire pour sortir la baguette, la peser au demi-décigramme près, la mesurer au $1/200$ de millimètre, la replacer, ne dépasse pas 35 secondes. La perturbation causée par le changement d'atmosphère est négligeable.

On peut ainsi étudier le retrait dans des hygrométries variables de 0 à 100. Une première expérience m'a montré que pour obtenir des points caractérisant bien la courbe il fallait considérer non des hygrométries croissant en proportion arithmétique, mais des hygrométries correspondant à des densités d'acide croissant en proportion arithmétique.

J'ai utilisé les dix mélanges indiqués au tableau suivant :

DENSITÉ DU MÉLANGE EAU-ACIDE.									
1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,84
ÉTAT HYGROMÉTRIQUE À 20°.									
100	92	79	59	36	18,5	9	2,5	0,7	ε

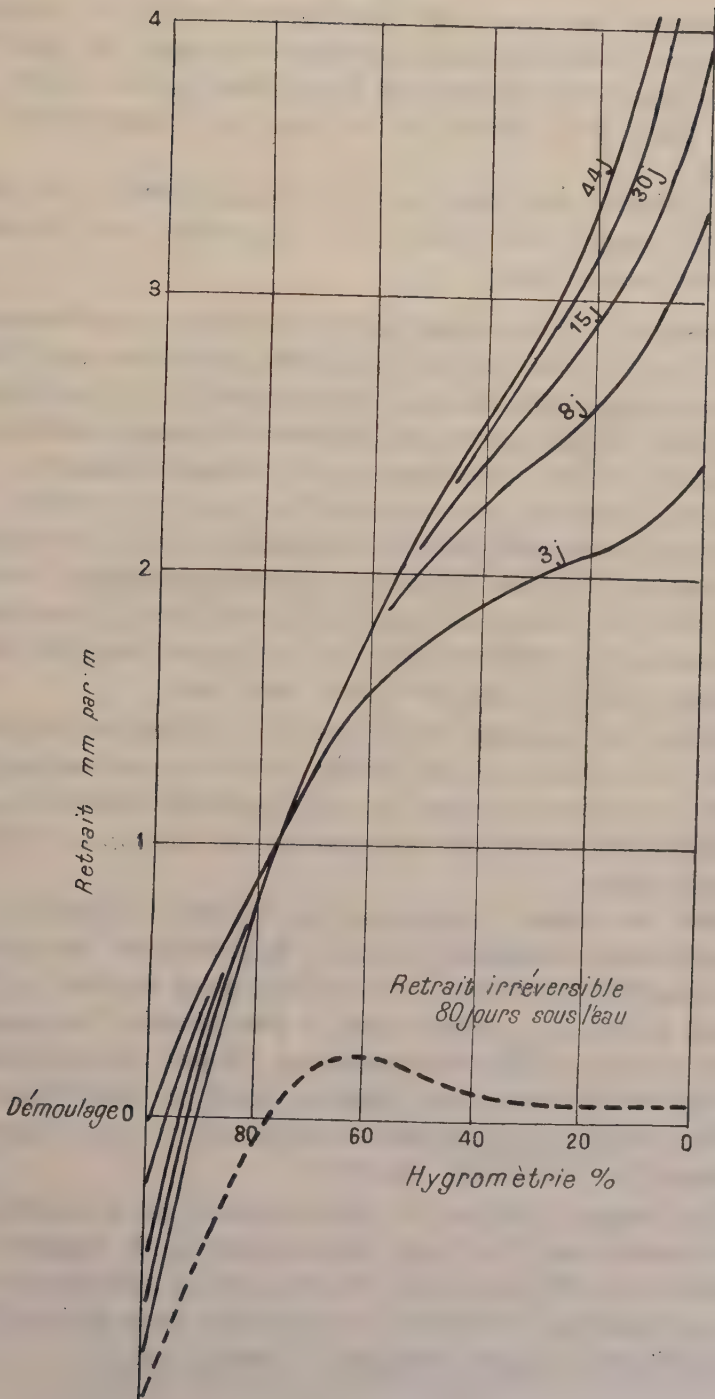


Fig. 7. — Retrait d'un ciment jeune dans différentes hygrométries. — Ciment fondu.

J'emploie par vase 300 centimètres cubes de mélange acide-eau. Connaissant à chaque instant la perte de poids de l'éprouvette, donc la quantité d'eau absorbée par l'acide, il m'est facile d'en déduire la variation de concentration de l'acide.

Il en résulte une faible variation d'hygrométrie qu'on peut souvent négliger en raison de la dispersion des résultats obtenus avec le ciment.

Résultats. — En opérant par les méthodes précédemment indiquées, on constate que la baguette conservée dans l'état hygrométrique 100 s'allonge, celle conservée dans l'état hygrométrique ε voisin autant que possible de 0 prend rapidement un retrait dépassant de beaucoup les valeurs ordinaires. Les baguettes intermédiaires prennent des retraits échelonnés. Si on porte en abscisses les états hygrométriques, en ordonnées les retraits, les points obtenus se répartissent sur une courbe en S de forme caractéristique. Les figures 7, 8, 9, 10 montrent les courbes de différents liants et leur aspect successif dans le temps jusqu'à un âge d'environ deux mois.

L'allure des courbes semble liée à la vitesse de durcissement : on obtient un S peu incliné pour le ciment fondu, plus incliné pour le superciment, on voit apparaître un palier pour les portlands et enfin un maximum et un minimum très nets pour la chaux.

Dans un même graphique les courbes successives se coupent dans la région des hautes hygrométries, les points d'intersection se situent à des hygrométries de plus en plus basses au fur et à mesure que le liant durcit : la baguette conservée dans l'état hygrométrique 92 par exemple prend d'abord un certain retrait, puis se stabilise, puis regonfle. Quelque temps après le même phénomène se passe dans les hygrométries 90, 85, etc. (fig. 13).

Cela montre bien que le retrait mesuré est la somme de deux variations, d'une part une diminution de longueur en relation avec l'hygrométrie, d'autre part un allongement dû aux modifications du corps. La vitesse des deux phénomènes est différente. Chacun l'emporte suivant le cas.

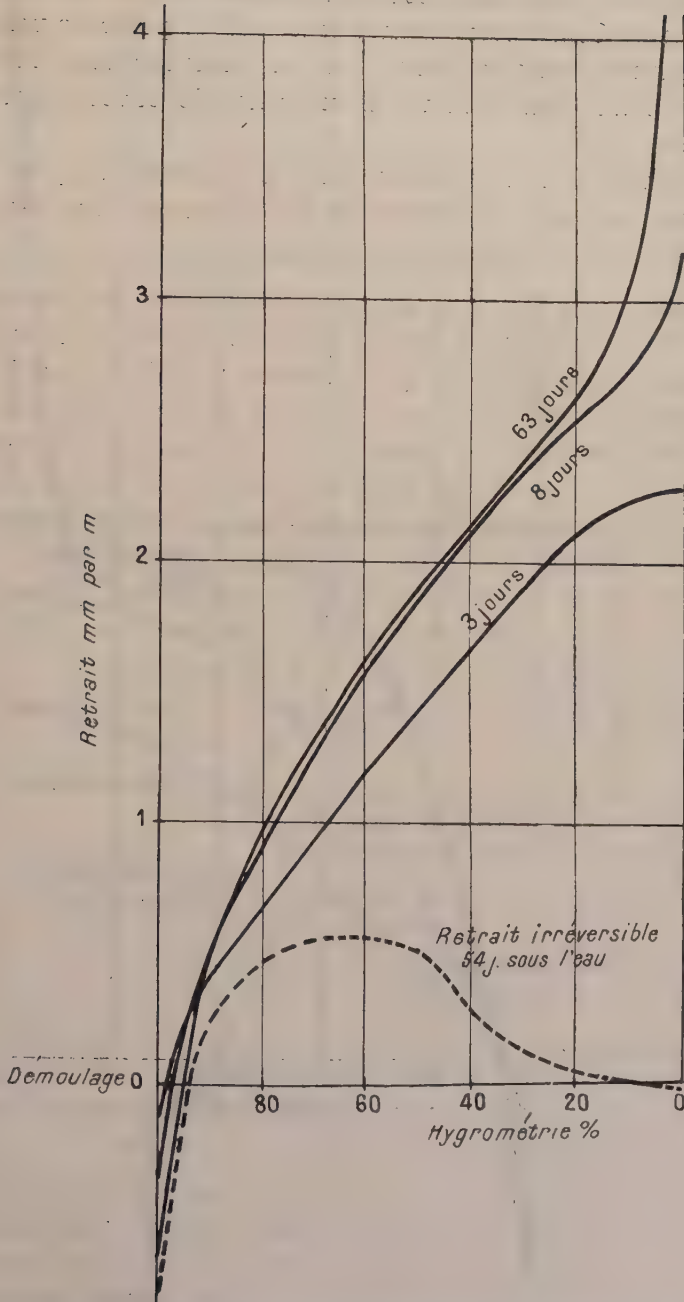


Fig. 8. — Retrait d'un ciment jeune dans différentes hygrométries. — Ciment H. R. II.
J. 37610-37.

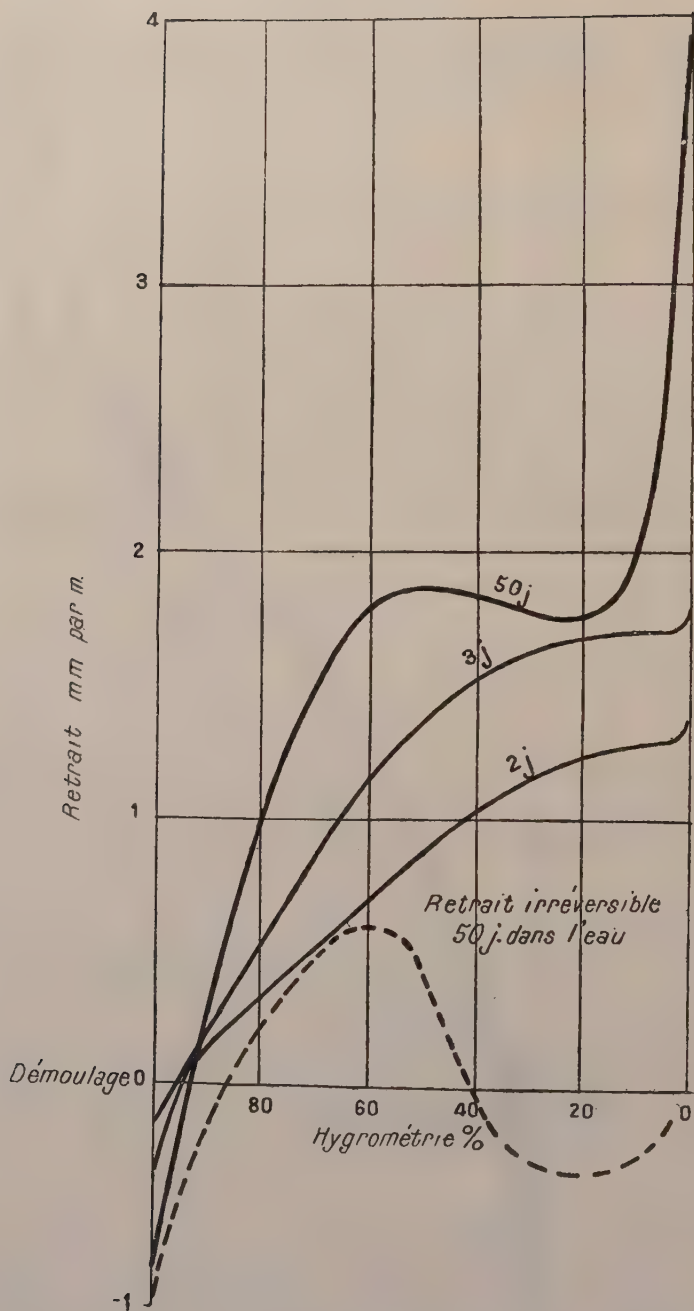


Fig. 9. — Retrait d'un ciment jeune dans différentes hygrométries. — Ciment artificiel.

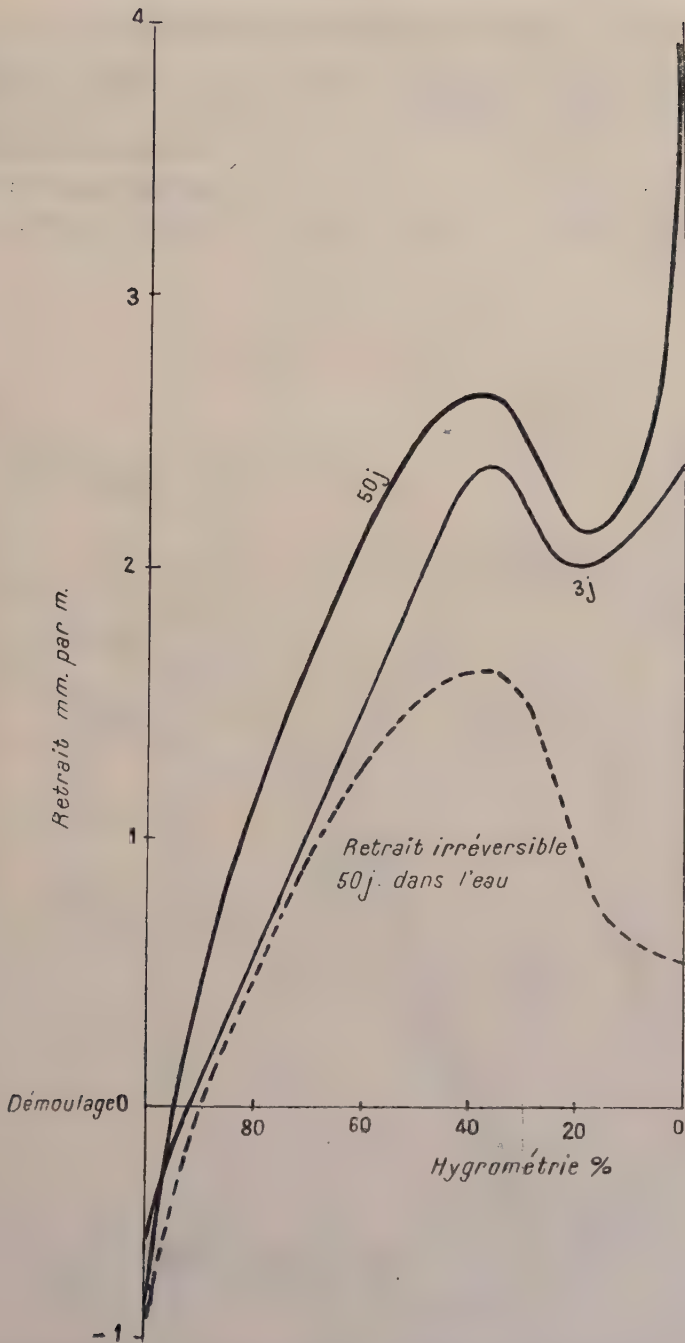


Fig. 10. — Retrait d'une chaux jeune dans différentes hygrométries.
Chaux hydraulique.

Variations du poids du ciment.

Parallèlement au retrait j'ai suivi par la mesure du poids la marche de la déperdition d'eau dans les différentes éprouvettes. Les figures 11 et 12 montrent les courbes obtenues pour les mêmes ciments à des âges successifs. La perte d'eau négative pour l'hygrométrie 100, croît d'abord très vite, puis s'atténue.

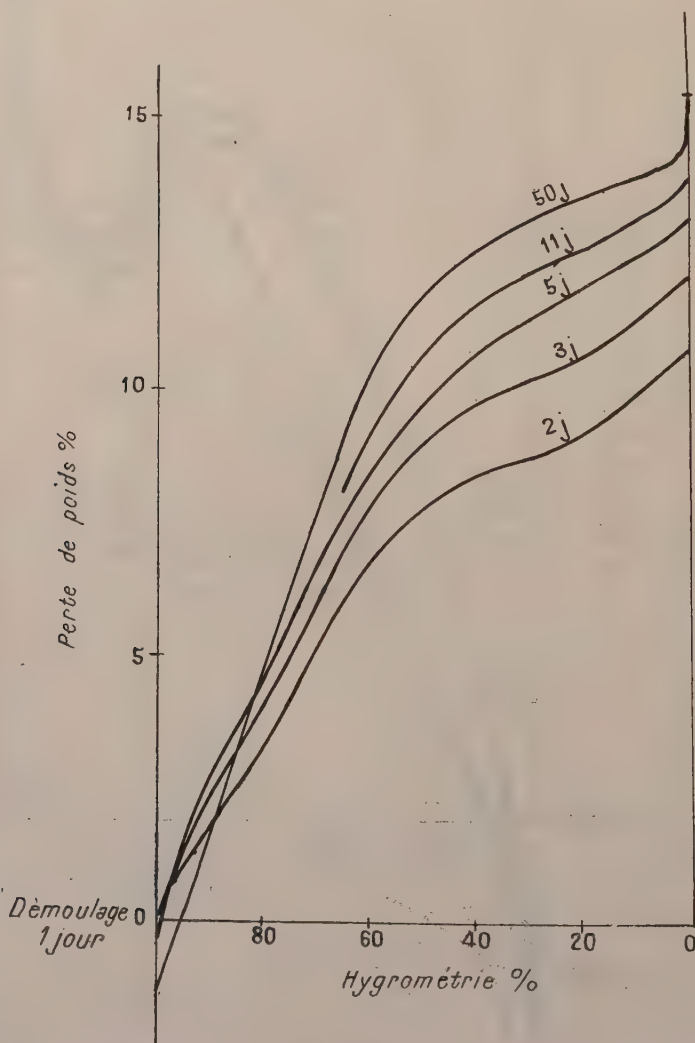


Fig. 11. — Perte de poids d'un ciment artificiel jeune dans différentes hygrométries.
Variation de la courbe dans le temps.

Comme pour le retrait, l'allure de la courbe est caractéristique de la vitesse de durcissement. D'une droite obtenue sensiblement avec le ciment fondu on passe, pour la chaux, à une courbe avec palier prononcé.

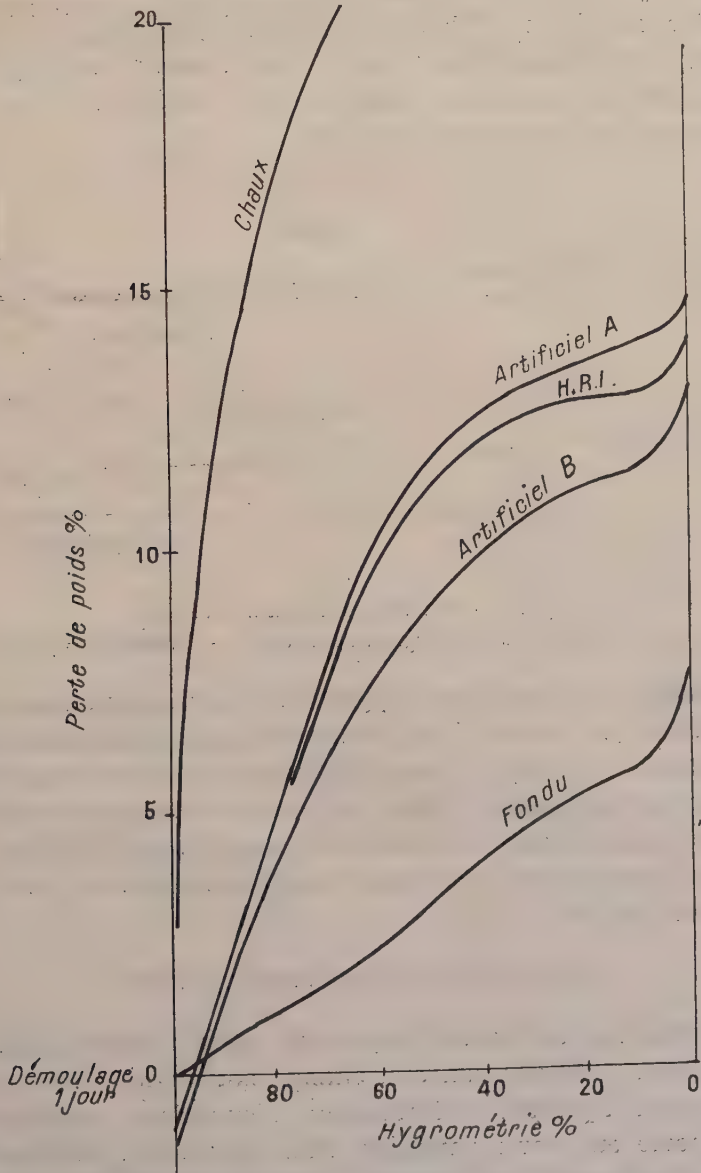


Fig. 12. — Perte de poids dans différentes hygrométries. — Ciments jeunes.

Le plus frappant est le fait qu'un ciment retient d'autant plus énergiquement son eau qu'il est lui-même plus énergétique : tandis que le fondu ne perd que 5 p. 100 de son poids (soit 25 p. 100 de son eau) la chaux perd plus de 25 p. 100 (soit 80 p. 100 et plus de son eau).

Là encore les courbes successives se coupent dans la région des hautes hygrométries : peu à peu, à partir de l'hygrométrie 100 les baguettes, après avoir perdu de l'eau, en reprennent plus ou moins (fig. 13).

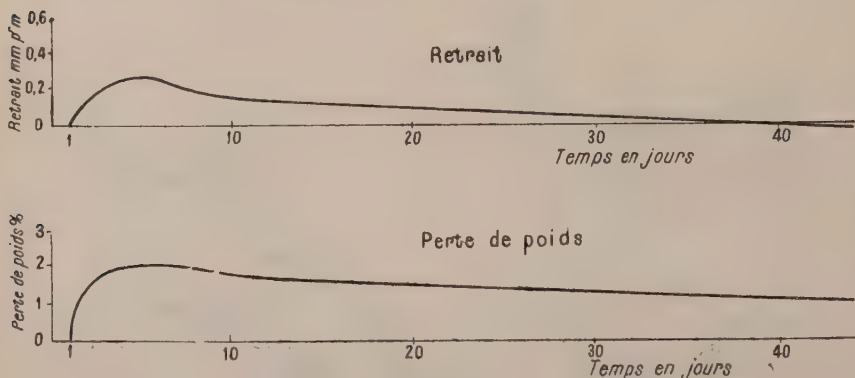


Fig. 13. — Variations de longueur et de poids
d'un ciment conservé à un état hygrométrique élevé. — Artificiel. E = 92 p. 100.

Telle est l'influence de l'hygrométrie sur le développement du retrait du ciment. Les phénomènes qui apparaissent très simples se compliquent dès que l'on veut pousser l'étude plus avant. Les principales causes qui interviennent sont les modifications subies par le ciment au cours de son évolution.

J'ai donc repris la même série d'expériences sur des ciments durcis.

PHÉNOMÈNES SUR DES CEMENTS DURCIS.

L'évolution du ciment, rapide au début, puis de plus en plus lente, fait que son état change notablement avant que les divers équilibres s'établissent. L'expérience ainsi réalisée porte sur deux variables. Pour l'éviter, il faut opérer avec des ciments chez lesquels l'évolution arrive à un ralen-

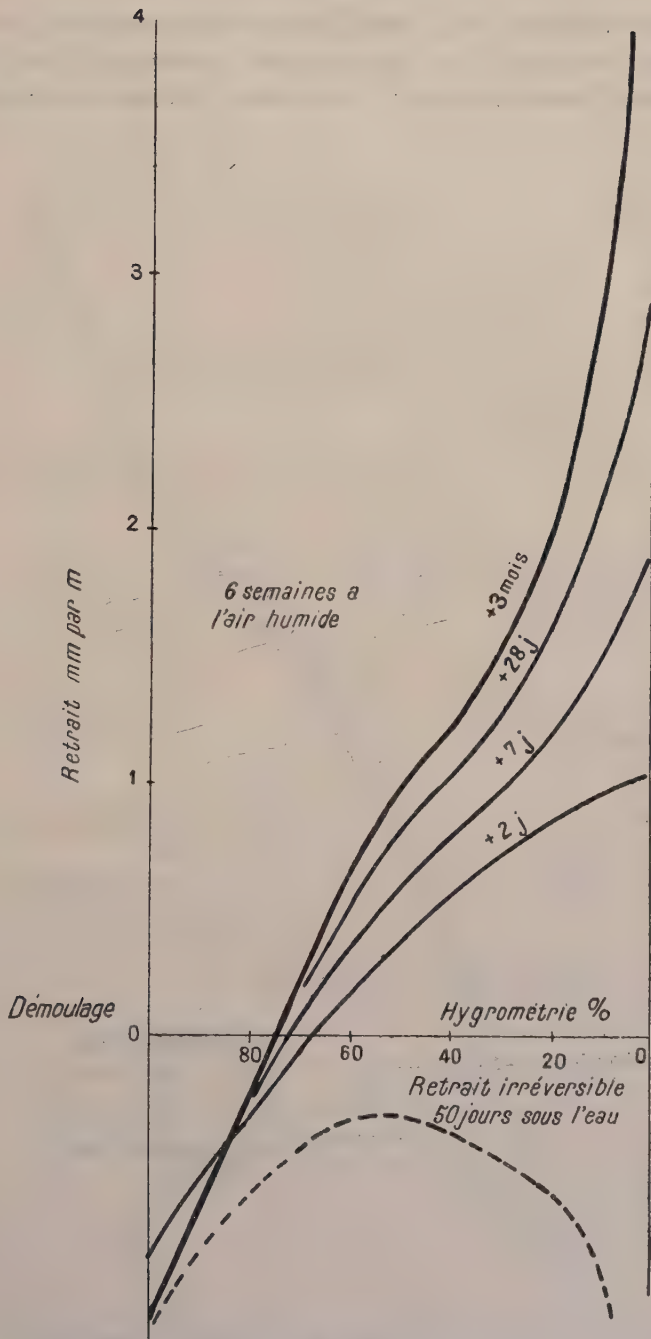


Fig. 14. — Retrait d'un ciment durci, dans différentes hygrométries. — Ciment fondu

tissement suffisant pour être insensible pendant la durée de l'essai. J'ai répété les expériences précédentes avec des baguettes identiques aux premières, gâchées et moulées

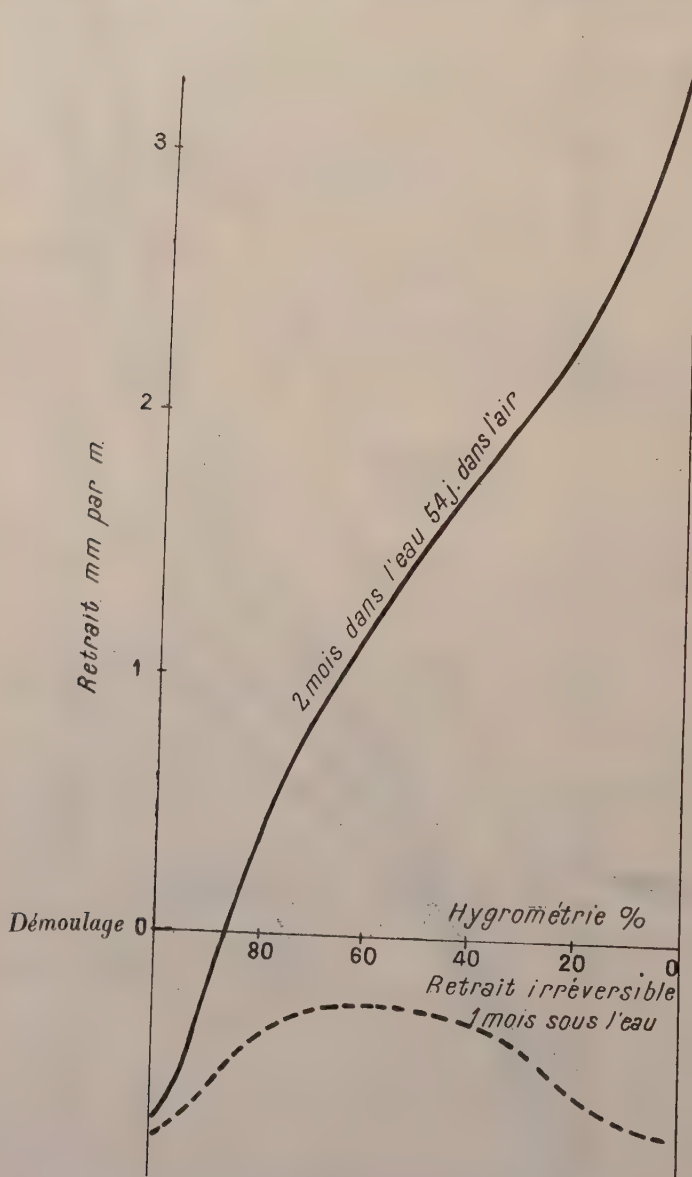


Fig. 15. — Retrait d'un ciment durci, dans différentes hygrométries.

... — Ciment H. R. I. ...

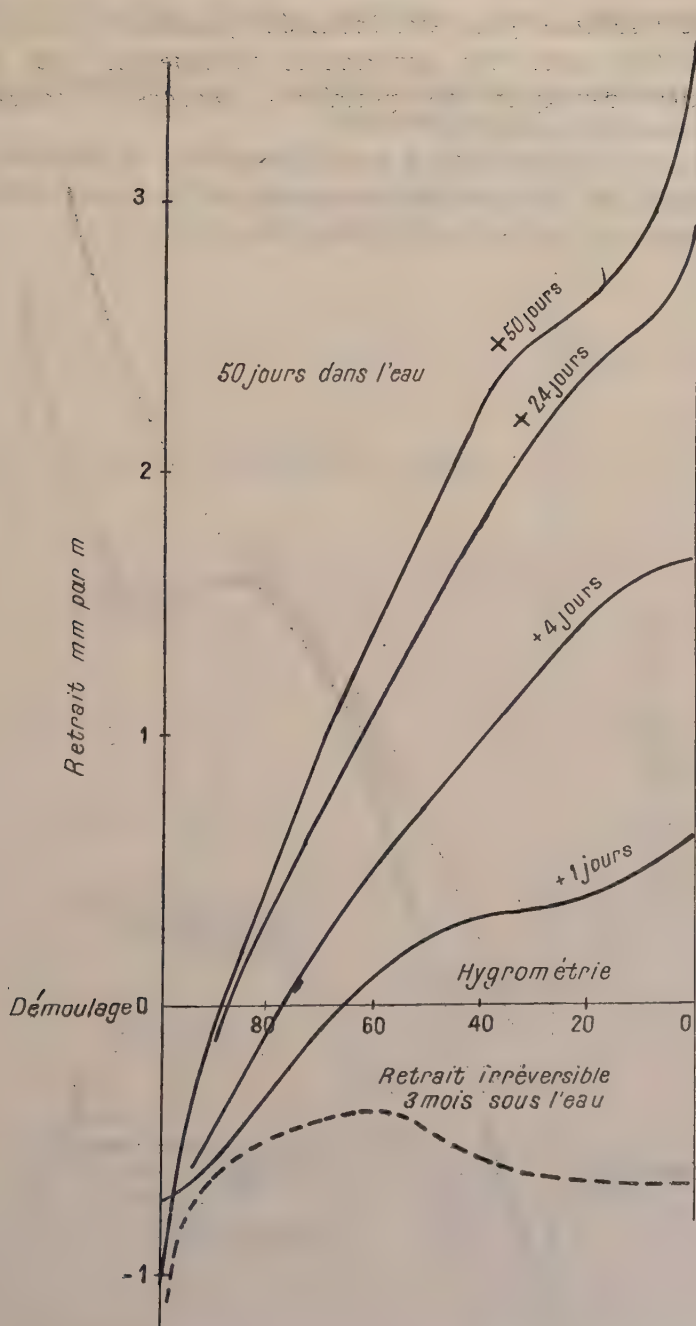


Fig. 16. — Retrait d'un ciment durci, dans différentes hygrométries.
Ciment artificiel.

simultanément, mais conservées ensuite deux mois sous l'eau.

Les courbes du retrait en fonction de l'hygrométrie différent beaucoup des précédentes.

Ce sont des courbes en S peu inclinées, on ne retrouve ni les paliers des hygrométries moyennes, ni les hautes valeurs du retrait aux faibles hygrométries (fig. 14, 15, 16, 17).

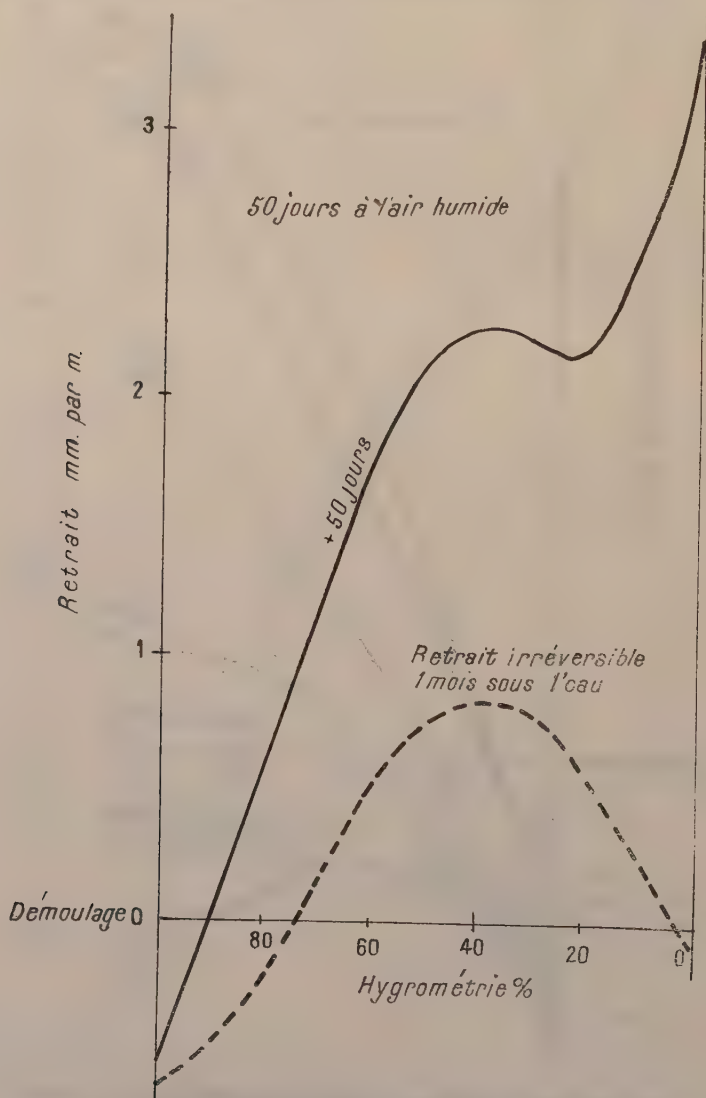


Fig. 17. — Retrait d'une chaux durcie, dans différentes hygrométries.
Chaux hydraulique.

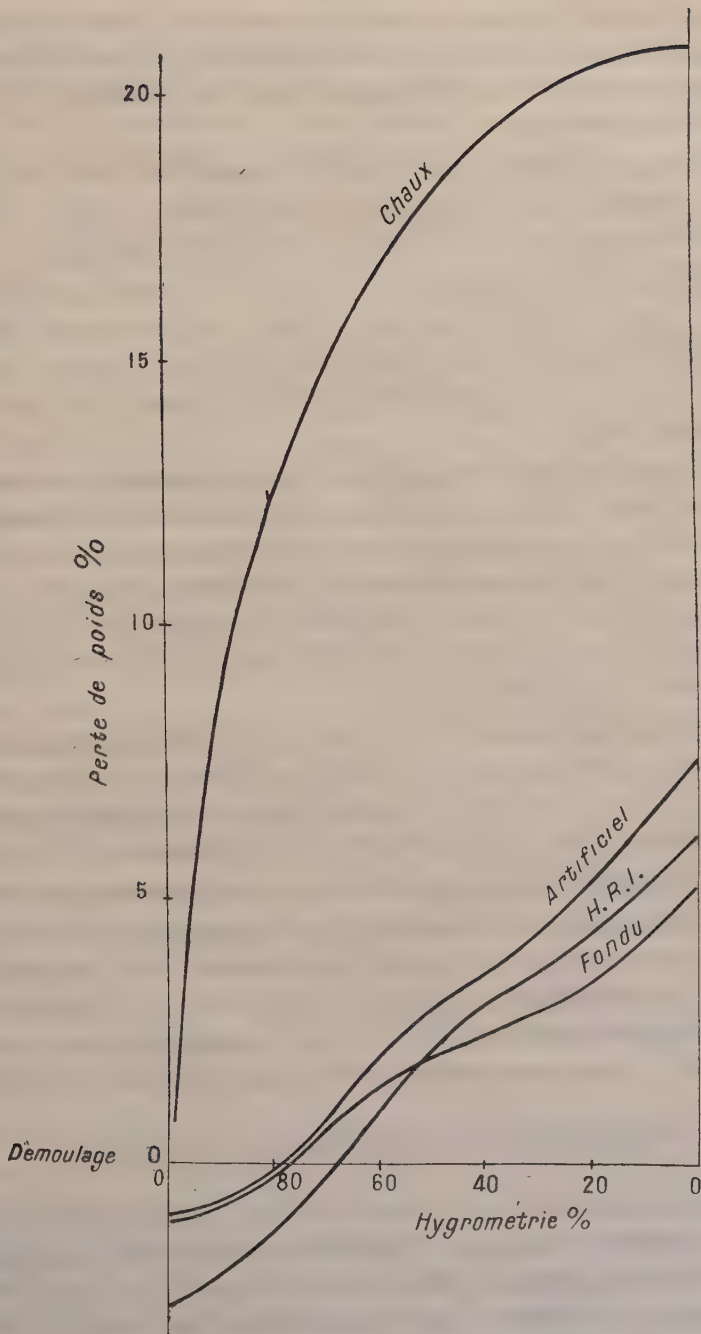


Fig. 18. — Perte de poids de ciments durcis, dans différentes hygrométries.

Ces courbes rappellent celle obtenue tout d'abord avec le ciment fondu : celui-ci en effet termine son évolution en quelques jours, moment auquel tous les équilibres ne sont pas encore réalisés.

La superposition pour chaque ciment des deux courbes, celle obtenue après démoulage, celle obtenue après durcissement montre qu'il existe deux points d'intersection.

Aux hautes hygrométries le retrait est d'autant plus faible que le ciment est exposé tard à l'air. Aux moyennes hygrométries, il est d'autant plus faible qu'il est exposé tôt. Il semble enfin qu'aux très faibles hygrométries on revienne au premier cas.

Ce dernier point est assez curieux. Il conduit à supposer qu'un ciment frais exposé à une hygrométrie inférieure à 5 p. 100 voit une partie de ses transformations arrêtées par manque d'eau. Le ciment jouerait partiellement le rôle d'une poudre inerte et l'on sait que pour ces poudres le retrait est beaucoup plus grand qu'il n'est habituellement pour le ciment hydraté (R. DUTRON).

Les courbes de pertes de poids à l'air des ciments durcis se présentent sensiblement sous la forme de droites et se trouvent très voisines; les ciments âgés se conduisent comme le ciment fondu : ils retiennent très énergiquement leur eau.

La courbe de la chaux elle-même s'est abaissée (fig. 18).

Ce phénomène est général. Il se présente pour tous les liants immergés à un moment quelconque puis ramenés à l'état hygrométrique précédant l'immersion. Ils gardent un poids notablement plus élevé, ayant emmagasiné une certaine quantité d'eau, eau inerte d'ailleurs au point de vue retrait.

RÉVERSIBILITÉ ET IRRÉVERSIBILITÉ DU RETRAIT.

Les déformations de retrait ne sont pas parfaitement réversibles, pour le constater, il suffit de ramener les baguettes à l'état hygrométrique 100 qu'elles avaient au moment du gâchage et qu'elles avaient sensiblement au moment de la mise en observation : on les immerge.

Le retrait décroît rapidement la première journée, puis très lentement au delà. Fait inattendu : le retrait est d'autant plus réversible qu'il avait atteint une grande valeur, c'est-à-dire qu'il avait été obtenu dans un état hygrométrique faible.

Sur les graphiques hygrométrie-retrait, précédemment tracés, les courbes obtenues présentent un maximum pour des hygrométries d'environ 60 p. 100. Ce maximum est d'autant moins net que le ciment durcit vite. La même progression se retrouve du ciment fondu à la chaux. Les baguettes conservées dans les états hygrométriques faibles reprennent sensiblement leur longueur de démoulage. Pour celles-ci aussi il semble subsister un retrait résiduaire : celui correspondant au gonflement de la baguette conservée dans l'état hygrométrique 100 (fig. 7 à 10 et 14 à 17, courbes en pointillé).

Remarque. — Si l'on admet que le retrait résulte d'une contrainte triple liée à l'hygrométrie (E. FREYSSINET) on peut expliquer les phénomènes précédents, en particulier les anomalies de réversibilité, par une forme particulière du diagramme retrait-contrainte de retrait.

Il faut imaginer que pendant la dessiccation le retrait croît d'abord proportionnellement à la contrainte, puis de moins en moins vite avec cette contrainte. Par immersion, le retour se ferait avec un coefficient de proportionnalité plus grand de telle sorte que les retraits les plus élevés seraient les plus réversibles.

CAS PARTICULIER.

Ciment durcissant dans un espace clos.

Ceci correspond au cas adiabatique envisagé du point de vue hygrométrique (voir p. 41) : il n'y a point d'échange d'eau entre le ciment et l'extérieur. C'est, en particulier, le cas des éprouvettes de ciment conservées dans des moules fermés.

Suivons de point en point le phénomène : La pâte de ciment obtenue au gâchage est une suspension de grains de ciment dans une phase liquide continue formée par l'eau. Ces grains ne sont pas simples, mais sont constitués eux-mêmes

par des agglomérats d'éléments plus fins retenant l'air. Les proportions respectives des trois corps sont d'ailleurs faciles à fixer, connaissant le poids spécifique du ciment et le rendement de la pâte (volume obtenu avec 1.000 gr. de liant, généralement 0,605 dm³).

Liant, 1.000 grammes.	320	centimètres	cubes.
Eau, 250 grammes....	250	—	—
Air	35	—	—

TOTAL.....	605	centimètres	cubes.
------------	-----	-------------	--------

Les premiers mouvements qui se produisent sont des phénomènes de sédimentation : les agglomérats de grains tombent et viennent au contact les uns des autres. Il se produit un affaissement plastique dans le sens vertical.

En même temps, sous l'effet de leur poids ces agglomérats tendent à se déplacer latéralement : il se produit un gonflement plastique dans le sens horizontal. Ce gonflement limité par la résistance des moules est peu important.

Au bout d'un certain temps, l'eau pénètre à l'intérieur des agglomérats et mouille une surface de grains suffisamment grande pour que la réaction devienne sensible. Cette réaction aboutit à la formation d'un corps différent : le ciment hydraté de poids spécifique 2,4. Comme l'a montré H. LE CHATELIER, elle se fait avec une réduction du volume total des constituants et une augmentation de leur volume apparent. Nous sommes alors en présence d'un complexe.

- ciment anhydre;
- ciment hydraté;
- eau;
- Air.

C'est la période de gonflement. Le ciment se présente sous forme d'un corps déjà rigide mais encore humide : il possède un excès d'eau.

Plus tard enfin, l'eau en excès est absorbée par la réaction qui se poursuit alors aux dépens de l'eau retenue mécanique-

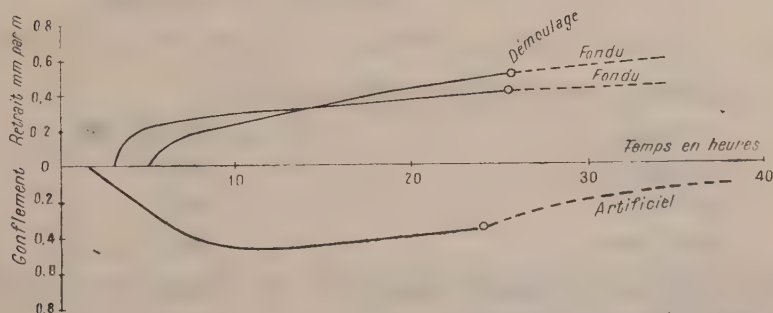
ment par les grains hydratés ou non : le ciment devient sec, il se produit un certain retrait.

En résumé, le phénomène comprend successivement : un affaissement plastique, un gonflement, un retrait.

C'est ce qu'on observe expérimentalement.

On peut mesurer l'affaissement plastique à l'aide d'un flotteur relié à l'aiguille d'un comparateur fixé au moule, mais l'expérience renferme de nombreuses causes d'erreurs.

Le gonflement et le retrait peuvent se mesurer à l'aide d'appareils ordinaires. On peut les suivre aussi par visées à l'aide d'un micromètre sur des repères fixés au ciment. La figure 19 indique quelques résultats obtenus. Ces phénomènes ne sont pas négligeables : comme nous le verrons ils peuvent provoquer l'allongement et le retrait des armatures du ciment armé pendant le premier jour.



[Fig. 19. — Variations de longueurs d'un ciment dans un coffrage clos pendant les premières heures. — Mortier 1/1.

Notons que dans le cas du ciment fondu le retrait commence à peu près au début de la prise définie à l'aiguille de VICAT et voile presque complètement le gonflement qui le précède. Ce fait est constant : le ciment fondu prend une grande partie de son retrait dans les moules, même quand ceux-ci sont clos ou insuffisamment humidifiés.

Le moment où commence le retrait est conditionné par la rapidité de la réaction et par la quantité d'eau disponible. Pour les ciments à hautes résistances initiales il peut se produire à vingt-quatre heures, pour les portlands au bout de quelques jours (fig. 20).

On peut définir l'état hygrométrique du ciment par l'état hygrométrique qui règne dans les petites cavités remplies d'air. D'après ce qui précède, cet air ne reste pas saturé : son état hygrométrique, au moment du gâchage, décroît peu à peu : 98..., 95..., 90.... On peut avoir une idée de sa valeur à l'aide de la courbe de la figure 9 en cherchant à quel point correspond le retrait mesuré sur une baguette isolée de l'air par une couche imperméable (enrobement de paraffine par exemple).

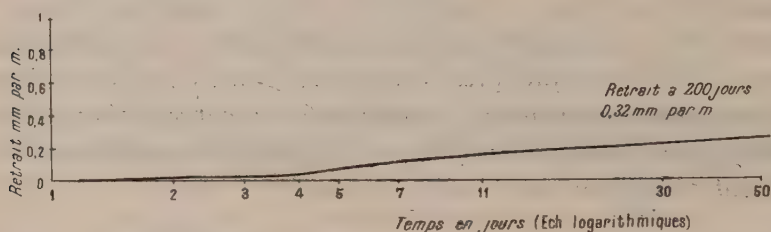


Fig. 20. — Retrait d'un ciment conservé dans un espace clos. (Perte de poids nulle.)

L'expérience faite sur un portland donne :

1 ^{er} jour.....	E = 100 p. 100.
4 ^e jour	96 —
30 ^e jour	90 —
150 ^e jour	85 —

ce n'est là qu'une mesure approchée ne tenant pas compte des variations du ciment.

II. VARIATIONS HYGROMÉTRIQUES DU RETRAIT ET DU POIDS (1).

Nous avons considéré jusqu'ici des ciments placés continuellement dans la même hygrométrie; il s'établissait un équilibre entre l'eau incluse et l'eau de l'atmosphère, équilibre correspondant à un certain retrait et à un certain poids.

Considérons maintenant un même ciment placé successivement dans diverses hygrométries; il s'établira chaque fois que l'équilibre sera atteint une certaine longueur et un certain poids fonction de l'hygrométrie. On peut ainsi définir

(1) C. R. Académie des Sciences, 1^{er} juillet 1936, tome 201, page 58.

des courbes de variations hygrométriques de poids et de longueur.

La méthode suivie repose sur l'emploi des exsiccateurs. Toutefois, étant donné le faible nombre d'éprouvettes, j'ai pu utiliser des appareils fixés à demeure sur le ciment dont ils

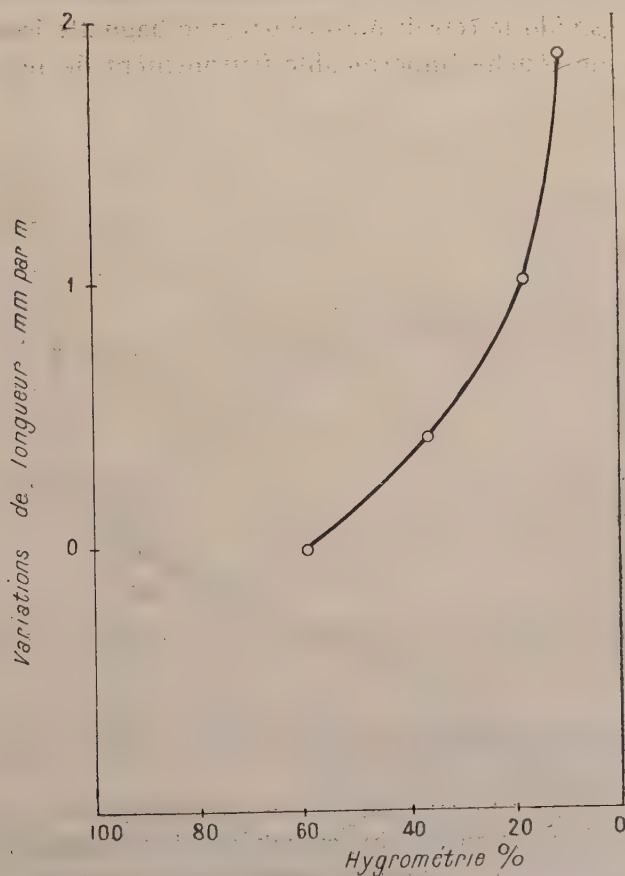


Fig. 21. — Variation de longueur d'un ciment artificiel en fonction de l'hygrométrie de l'air.

indiquaient la longueur d'une façon continue et avec grande précision. Ces appareils comprenaient toujours un comparateur monté de diverses façons (fig. 3) et permettant d'apprécier jusqu'au micron. Une telle précision n'est pas vaine car, les essais portant sur la même éprouvette, il n'y a pas de

dispersion à craindre. Les variations de longueur se lisant directement par le déplacement de l'aiguille du comparateur, on peut suivre de l'extérieur, sans ouvrir l'enceinte, l'établissement de l'équilibre. La courbe de variation de longueur en fonction du temps est une courbe d'amortissement apério-

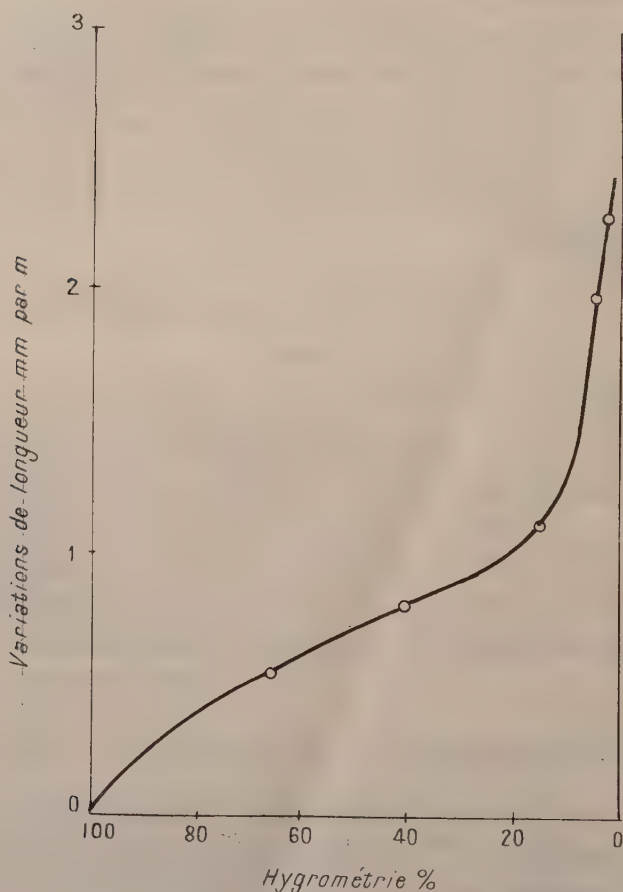


Fig. 22. — Variation de longueur d'un ciment en fonction de l'hygrométrie.
Ciment de laitier.

dique car la longueur de l'éprouvette tend vers une longueur limite avec une vitesse d'autant plus grande qu'elle est plus éloignée.

L'expérience réalisée est la suivante : Un ciment étant en équilibre dans l'hygrométrie 60 prise comme base, on le

transporte dans une autre hygrométrie x jusqu'à ce que l'équilibre de longueur soit réalisé. On le pèse alors et on note la longueur atteinte. On le ramène à l'état hygrométrique 60 jusqu'à un nouvel équilibre. On donne à x successivement les valeurs, 70, 80... La courbe des états d'équilibre est la courbe cherchée.

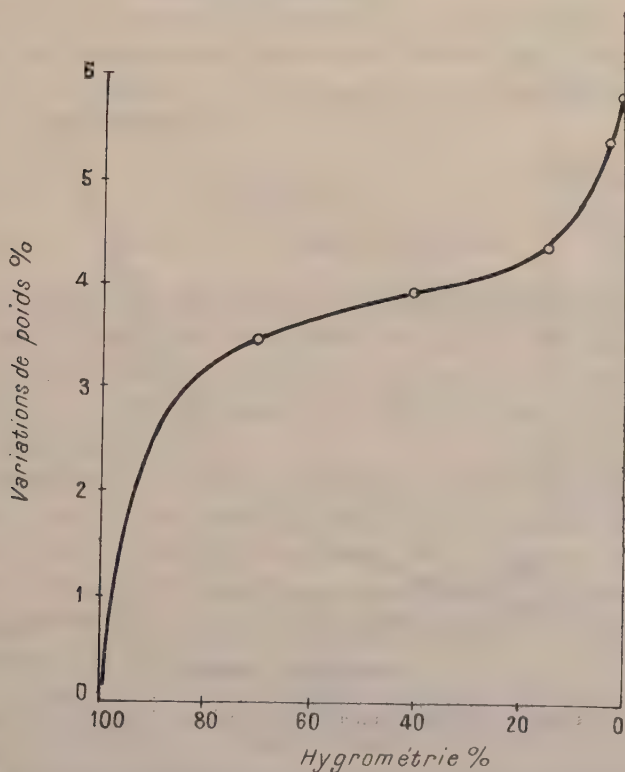


Fig. 23. — Variation du poids d'un ciment en fonction de l'hygrométrie de l'air.
Ciment de laitier.

En raison des variations que le ciment subit au cours de son durcissement, on ne peut réaliser une expérience complète que sur un ciment ayant à peu près terminé son évolution.

La difficulté de l'expérience réside dans le temps extraordinairement long nécessaire à l'établissement des équilibres. Pour un ciment artificiel courant, il faut attendre parfois plu-

sieurs mois. Au retour il subsiste généralement un retrait résiduaire.

Les figures 21 et 22 représentent les courbes d'équilibre obtenues : la première pour un artificiel, la deuxième pour un ciment de laitier pour lequel les équilibres se sont réalisés beaucoup plus rapidement (maximum vingt jours).

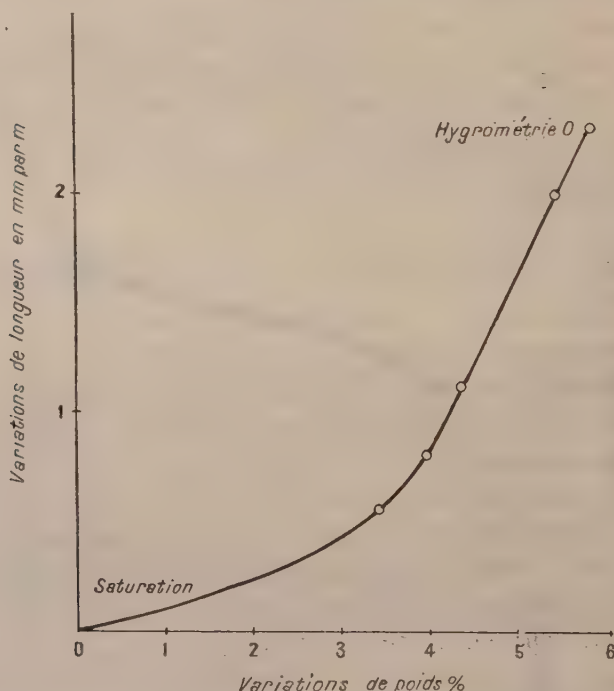


Fig. 24. — Relation entre les variations hygrométriques de poids et de longueur.
Ciment de laitier.

Dans chaque cas, on obtient une inflexion pour les hygrométries moyennes. On peut admettre dans cette région une variation linéaire :

$$\frac{\Delta l}{l} = k \cdot \Delta E.$$

l = longueur;

E = état hygrométrique pour cent;

k = constante :

premier ciment : $k = 18 \times 10^{-6}$

deuxième ciment : $k = 11 \times 10^{-6}$.

La figure 23 représente la courbe de variation de poids d'une éprouvette de ciment de laitier pendant la même expérience, la figure 24 la relation entre les variations de longueur et de variations de poids.

On constate, ce qui est logique, qu'une perte d'eau du ciment influe peu sur le retrait aux hautes hygrométries et beaucoup aux basses hygrométries.

J'ai cherché depuis à accélérer les phénomènes, soit en plaçant les exsiccateurs dans une étuve à 60°, soit en faisant un vide partiel à l'intérieur. Le gain de temps qui en résulte est considérable.

CONSÉQUENCES.

Lois de déformation du ciment.

Ainsi, nous voyons agir sur la déformation du ciment le facteur hygrométrie au même titre que le facteur température qui agit sur tous les corps. Quand un ciment change d'ambiance, il est nécessaire de lui appliquer les lois des deux déformations.

La dilatation thermique est facile à déterminer : il suffit de faire varier la température d'un ciment contenu dans une enceinte dont l'état hygrométrique reste constant. Le plus simple est d'adopter l'état hygrométrique 100 en immergeant la baguette. De cette façon, j'ai obtenu plusieurs fois des coefficients de dilatation voisins de 11×10^{-6} (ciments purs). Là encore il est nécessaire d'opérer sur des ciments durcis. L'élévation de température contribue en effet au vieillissement du ciment, il en résulte un gonflement qui se superpose à la dilatation. Ce gonflement d'ailleurs ne disparaît pas au refroidissement.

On peut aussi utiliser les appareils décrits plus hauts — exsiccateurs à acide sulfurique et comparateur à tige d'INVAR — en les portant à des températures variables dans des étuves. L'air de l'exsiccateur conserve en effet sensiblement la même hygrométrie.

Notons toutefois qu'au point de vue physique il existe des différences profondes entre la dilatation thermique et la

dilatation hygrométrique. Celle-ci nécessite en effet l'intervention d'un corps : eau — ou un autre liquide qui mouille le ciment.

D'autre part, l'action de la température est assez rapide : il suffit de quelques heures pour homogénéiser la température d'un bloc. Au contraire, il faut un délai très long — plusieurs mois — pour réaliser l'équilibre hygrométrique.

Vraisemblablement, le délai augmente avec la compacité du bloc et le dosage en ciment, qualités s'opposant à la diffusion de l'eau dans le solide.

Évolution totale du retrait. — La courbe de dilatation hygrométrique (fig. 22) est une courbe sensiblement réversible. Ce serait la courbe qu'on obtiendrait en exposant dans des hygrométries différentes des échantillons de ciment conservés très longtemps dans l'hygrométrie 100. Elle se présente comme la limite dans le temps des courbes (fig. 7 et fig. 14).

Si on superpose d'autre part une courbe telle que celle de la figure 7 obtenue en exposant des éprouvettes de ciments jeunes à des hygrométries différentes et les courbes de dilatation hygrométriques correspondant à chaque éprouvette, on obtient un graphique qui représente l'évolution totale du retrait.

En particulier, si on ramène à une même hygrométrie toutes les éprouvettes de la courbe, chacune s'allonge ou se raccourcit d'une quantité déterminée. On obtient une courbe avec maximum et minimum.

Conséquence. — Une éprouvette conservée dans une certaine hygrométrie prend, suivant les cas un retrait plus grand ou plus faible que celle conservée dans une hygrométrie différente.

J'ai essayé de tracer cette courbe en exposant à l'air des baguettes conservées dans des exsiccateurs. J'ai obtenu les courbes 26. Un autre phénomène est intervenu : la carbonatation dans l'air du laboratoire : tous les retraits augmentent notablement, ainsi que les poids, ce qui indique une absorption.

Les expériences ci-dessus se rapportent à des ciments âgés au plus de quelques années. Que deviennent les variations hygrométriques avec le temps?

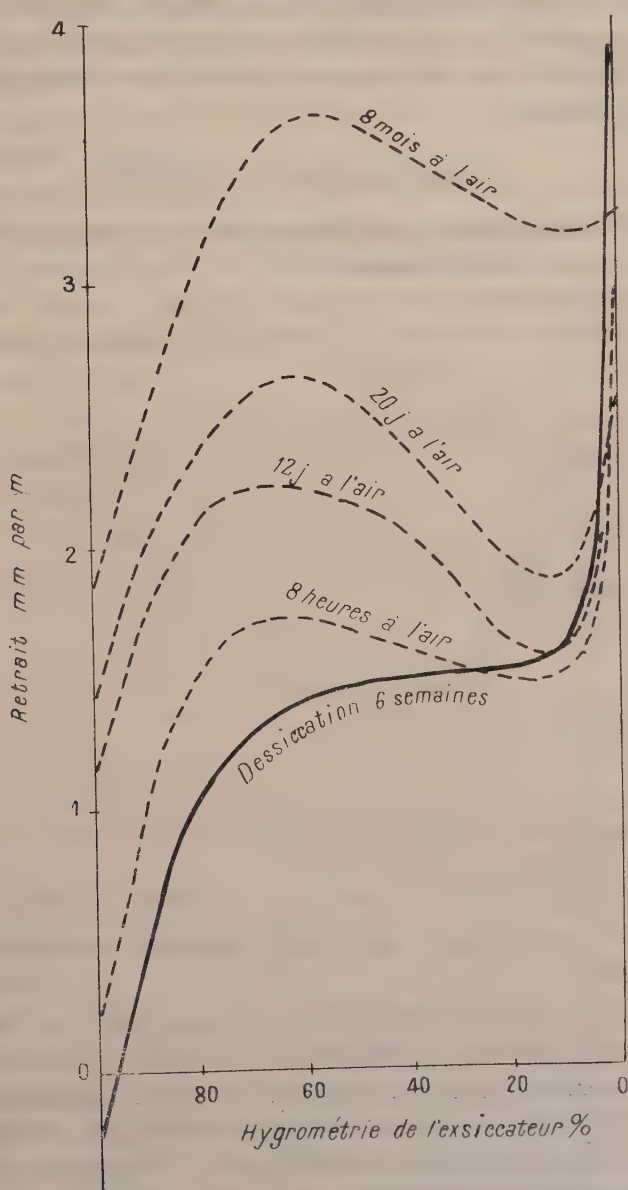


Fig. 26. — Retrait de baguettes exposées à l'air libre après un séjour dans les exsiccateurs.

Il semble que le coefficient de variation décroisse et que les équilibres s'établissent de plus en plus lentement.

J'ai cherché à établir le coefficient de dilatation hygrométrique de ciments purs gâchés en 1896 et conservés depuis à l'air humide. Je n'ai actuellement que la preuve de l'existence de variations de longueur sensiblement normales pour de tels ciments.

Ciments conservés à l'air libre.

L'état hygrométrique de l'atmosphère est variable, dans le temps, comme dans l'espace.

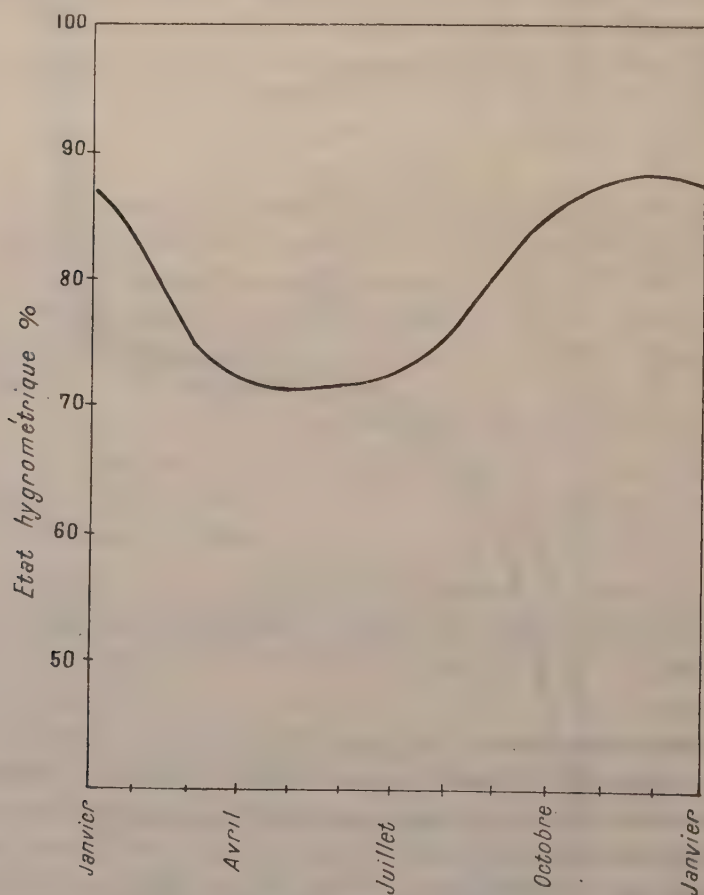


Fig. 27. — Variation annuelle de l'hygrométrie. (Région parisienne).

En un point donné, il diffère suivant le mois, le jour et même l'heure de la journée. Les figures 27 et 28 sont les courbes de variations moyennes établies sur un grand nombre d'années pour la région parisienne. Elles diffèrent naturellement pour chaque observatoire (Office national de météorologie).

Au cours de l'année, le mois le plus sec semble mai, le plus humide décembre.

Au cours de la journée, le maximum s'établit un peu avant le lever du soleil, le minimum vers 14 heures. L'hygrométrie suit dans ce cas les variations de température, la tension de vapeur restant sensiblement constante pendant vingt-quatre heures.

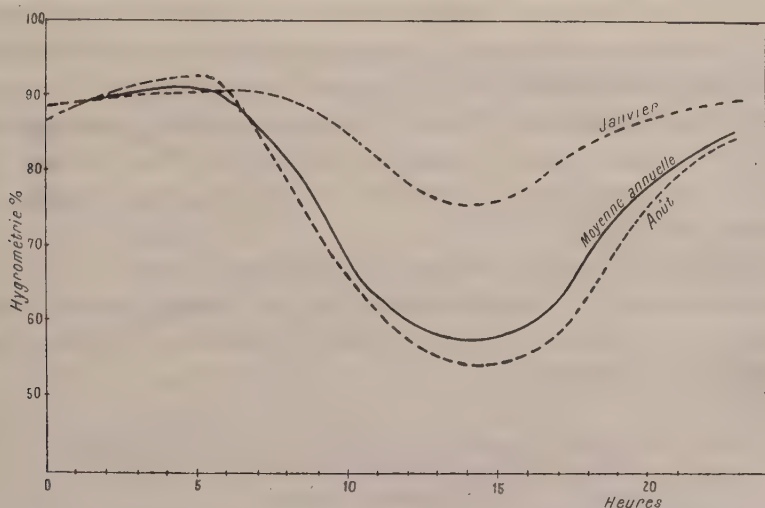


Fig. 28. — Variations diurnes de l'hygrométrie. (Région parisienne.)

La moyenne annuelle dans nos régions est d'environ 80 p. 100.

Autour de cette moyenne, l'état hygrométrique peut varier d'un extrême à l'autre. Il atteint 100 au moment des pluies, il peut descendre très bas par temps chaud (6 le 9 août 1907, température 25°) comme par temps froids (10 le 25 janvier 1907, température 6°). Il a d'ailleurs peu d'effet dans ce dernier cas, les échanges d'eau étant considérablement ralentis.

L'état hygrométrique varie aussi d'un point à un autre. En

particulier, dans un local clos, chauffé, il est notablement moins élevé qu'à l'extérieur; en hiver on enregistre couramment 40 p. 100 à l'intérieur, 90 p. 100 à l'extérieur. Conséquence : les expériences effectuées à l'intérieur d'un laboratoire sont faites dans un domaine différent de celui dans lequel on veut les appliquer.

Le ciment tend à suivre les variations auxquelles il est soumis. Dans le cas de petits échantillons, l'équilibre s'établit rapidement et on peut suivre le parallélisme des variations d'hygrométrie, de longueur et de poids. On obtient ainsi un hygromètre, assez peu sensible d'ailleurs (il en sera tout autrement avec la contrainte de retrait, p. 56).

Au contraire, dans les massifs importants, l'équilibre des couches profondes se réalise moins vite que ne varie l'état hygrométrique extérieur. Il s'ensuit de multiples contraintes, probablement faibles dans le cas de variations journalières plus importantes dans le cas de variations lentes. Elles atteignent leur maximum quand l'équilibre ne peut jamais se réaliser, comme dans le cas de constructions partiellement immergées.

A l'air libre, particulièrement à l'intérieur des locaux, un autre facteur de retrait intervient : la carbonatation. Son rôle est essentiel dans le retrait des petites éprouvettes (p. 47).

INFLUENCE DE FACTEURS SECONDAIRES SUR LE RETRAIT.

1° *Nature du liant.*

Le retrait diffère suivant la nature du liant, mais le peu de fidélité de l'essai de retrait, entaché des erreurs correspondant au gâchage, à la conservation, à diverses propriétés mal connues, empêche d'affirmer que les écarts constatés d'un ciment à l'autre soient systématiques.

Si l'on s'attache aux ciments courants : artificiels, ciments à hautes résistances initiales, alumineux fondus, on constate que c'est surtout l'allure de la courbe retrait-temps qui varie, la valeur atteinte à deux ans étant 2 à 3 millimètres (hygrométrie 70 à 80).

Il existe une analogie frappante entre cette courbe et celle de la réaction eau-ciment telle qu'on peut la caractériser en utilisant un paramètre plus connu : résistance mécanique, dégagement de chaleur, volume d'hydratation.

Un facteur particulier au ciment semble être la granulométrie des grosses particules. Celles-ci en effet n'entrent pas complètement en réaction et le ciment se comporte à la façon d'un mortier. L'examen de lames taillées dans le ciment durci le montre aisément.

2° Influence des agents chimiques.

Presque toutes les matières ajoutées au ciment au cours du gâchage augmentent le retrait, dans des proportions parfois considérables.

Il est difficile de donner des chiffres, ceux-ci pouvant différer du simple au triple suivant les ciments utilisés et les circonstances de l'essai. Le retrait peut être ainsi augmenté de l'ordre de 25 p. 100.

Certains corps tels que le chlorure de calcium, accélérant de prise et de durcissement, augmentent beaucoup le retrait, d'autres, au contraire, tels que les émulsions de bitume, qui ralentissent la prise et le durcissement, ralentissent aussi le retrait mais seulement pendant quelques jours.

Les impuretés contenues dans l'eau de gâchage elle-même influent beaucoup, le retrait minimum étant obtenu avec de l'eau distillée.

Carbonatation.

Parmi les agents chimiques qui agissent sur le retrait après la prise, le rôle du gaz carbonique est prépondérant, la chaux libre du ciment fixe le gaz carbonique de l'atmosphère : il se forme une couche périphérique de carbonate de chaux, décelable aisément car elle fait effervescence avec les acides.

Voyons par exemple comment se comportent d'une part deux baguettes conservées dans des flacons d'états hygrométriques 60 et 40, d'autre part une baguette conservée directement à l'air d'état hygrométrique variable entre 40 et 60. La courbe de retrait de cette dernière baguette

s'échappe rapidement de la zone limitée par les deux autres et prend des valeurs nettement plus élevées. La courbe de perte de poids, au contraire, est d'abord intermédiaire entre les deux autres, puis s'abaisse graduellement : la baguette à l'air libre augmente peu à peu de poids par suite de l'absorption d'anhydride carbonique.

L'influence de la carbonatation a été étudiée en détail par le Bureau anglais de recherches sur les bâtiments qui a donné des courbes de retrait obtenues dans l'air et dans le gaz carbonique. Le retrait dans ce dernier cas est considérablement plus élevé qu'à l'air libre.

RETRAIT DES MORTIERS.

Les mortiers sont formés de matériaux inertes et de ciment, les plus fins des matériaux inertes étant d'un diamètre supérieur à celui des plus gros grains de ciment (100 microns).

Tant que le mortier est suffisamment riche pour que les matières inertes soient complètement enrobées, il semble que le retrait soit dû uniquement au ciment et que l'on puisse appliquer une loi de proportionnalité. En réalité, la quantité d'eau par rapport au ciment croît quand le dosage s'abaisse, elle entraîne une augmentation du retrait.

Le tableau suivant donne pour différents dosages le rapport du retrait du ciment pur à celui des mortiers.

DOSAGE.	RAPPORT POIDS TOTAL Poids ciment.	RAPPORT RETRAIT PUR Retrait mortier.	REMARQUES.
1/1	2	2	Moyenne de 10 essais, moyenne des écarts : $\pm 0,17$.
1/2	3	2,7	10 essais, éc. : $\pm 0,25$.
1/3	4	3,1	50 essais, éc. : $\pm 0,5$.

Ces chiffres varient suivant la nature du sable entrant dans les mortiers. Dans le deuxième cas par exemple on trouve 2,9 pour les mortiers de sable de Seine (tout venant), 2,6 pour les mortiers de sable de Leucate (sable normalisé sans grains fins). Ce fait est en relation avec la plus grande quantité d'eau nécessaire au gâchage avec le sable de Seine.

III. EFFET MÉCANIQUE DU RETRAIT DES CEMENTS.

Quand une force s'oppose au retrait, le ciment conserve plus ou moins ses dimensions initiales. On peut considérer qu'il subit un allongement égal au retrait qui ne peut se produire. Il se développe donc des contraintes qui, d'après la loi d'élasticité, sont proportionnelles à ce retrait.

Mais le phénomène se complique d'une part à cause de la faculté d'adaptation du ciment, d'autant plus grande que le ciment est jeune, d'autre part à cause des changements mécaniques que subit le ciment au cours de son évolution, en particulier à cause de la variation du coefficient d'élasticité.

J'ai étudié ces contraintes dans le cas où elles sont dues à un corps inerte pris dans la masse du ciment. J'ai considéré successivement :

1° Les contraintes transversales imposées par le ciment d'une plaque à un corps étranger de petites dimensions placé au centre (cas des pierres du béton, des armatures, des pavés de verre [étude photoélasticimétrique]);

2° Les contraintes linéaires résultant de la présence d'une tige longue dans un prisme (cas d'une armature de ciment armé).

I. ÉTUDE PLANE DES CONTRAINTES DUES AU RETRAIT.

Étude photoélasticimétrique (1).

Le problème traité est le suivant : étudier parallèlement le retrait d'une plaque de ciment et la contrainte qu'il impose à un morceau de verre placé au moment du moulage au centre de la plaque.

Le verre est un cylindre de 16 millimètres de diamètre, 12 millimètres de hauteur, percé d'un trou axial de 5 millimètres disposé de telle sorte que son axe soit perpendiculaire à la plaque dans laquelle il est encastré.

Le ciment est en plaque de 12 millimètres d'épaisseur, de forme variable, circulaire ou rectangulaire (largeur 60 mm., longueur 250 à 333 m.) [fig. 29].

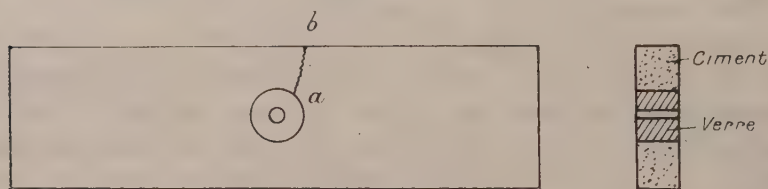


Fig. 29. — Éprouvette servant à étudier la contrainte exercée par le retrait sur un cylindre de verre.

Le retrait se mesure par les méthodes précédemment indiquées à l'aide d'un appareil à vis micrométrique, à microscope ou à comparateur.

Le retrait total de la plaque est peu influencé par la présence du cylindre de verre, on mesure sensiblement le retrait d'une pièce libre. Je l'ai du reste vérifié par des mesures comparatives sur des plaques, les unes avec des pastilles de verre, les autres sans. L'écart des retraits mesurés ne dépasse pas 10 p. 100, c'est-à-dire l'écart normal qu'on peut trouver dans l'essai de retrait sur deux éprouvettes suivies parallèlement.

La contrainte supportée par le verre se détermine par la mesure de la biréfringence accidentelle à l'aide de la lumière polarisée, par la méthode de photoélasticité.

(1) C. R. Académie des Sciences, 30 mars 1936, tome 202, page 1153.

Cette méthode est peu répandue, j'en rappellerai brièvement les caractéristiques.

*
**

Certaines substances telles que le verre deviennent biréfringentes sous l'action de contraintes mécaniques. La biréfringence se détermine à la lumière polarisée, on en déduit la valeur et la répartition des contraintes.

L'opération se fait en deux phases :

1° Détermination des directions principales en chaque point (tracé des courbes isostatiques);

2° Détermination des valeurs numériques de chaque contrainte.

Si on examine un modèle de verre chargé entre deux nicols croisés, on aperçoit sur un fond clair, d'une part des franges colorées, d'autre part des courbes noires plus ou moins compliquées qui sont les lignes isoclines, lieux géométriques des points pour lesquels les directions des tensions principales sont parallèles aux axes des nicols. Quand on tourne simultanément les deux nicols, les lignes isoclines se déplacent et balayent le verre. On relève leur position pour quelques rotations déterminées des nicols. On en déduit graphiquement les lignes enveloppes des contraintes principales ou courbes isostatiques.

Si on place deux lames cristallines quart d'onde de part et d'autre des nicols, on transforme la lumière polarisée rectiligne en lumière polarisée circulaire. Les lignes isoclines disparaissent. On aperçoit seulement les franges colorées ou lignes isochromatiques. Ce sont les lieux des points pour lesquels la différence des contraintes principales est constante. Cette différence correspond d'ailleurs à la coloration.

On détermine plus exactement la différence des contraintes principales en un point en utilisant un procédé de compensation ou le procédé goniométrique TARDY qui consiste à faire tourner l'analyseur jusqu'à l'extinction au point étudié.

On obtient ainsi les courbes isostatiques pour l'ensemble du modèle et la différence des contraintes principales en chaque point. Le reste du problème — détermination de chaque contrainte — peut se traiter graphiquement par intégration le long des isostatiques à partir d'un point connu, un point d'un contour libre par exemple. Mais l'application de la méthode est délicate.

On peut éviter l'intégration par divers procédés.

L'un d'eux consiste à déterminer la somme des contraintes principales en mesurant la variation d'épaisseur du modèle. Connaissant leur somme et leur différence, on obtient immédiatement chacune d'elles (A. MESNAGER-M. COKER).

D'autres reposent sur la mesure de la variation des épaisseurs optiques (M. FAVRE-C. FABRY) ou sur l'étude des formes d'une feuille de caoutchouc tendue sur un contour connu (J. C. MAC GIVERN-H. L. SUPPER).

J'ai utilisé particulièrement le procédé de M. TESAR qui consiste à percer un trou de petite dimension au point dont on désire connaître les contraintes. Les contraintes ν_I et ν_{II} sur le bord du trou se lisent directement à l'aide du goniomètre TARDY. On en déduit les contraintes ν_1 et ν_2 qui existaient à l'emplacement du centre s'il n'y avait pas de trou, par les formules suivantes :

$$\nu_1 = \frac{1}{8} [3 \nu_I + \nu_{II}],$$

$$\nu_2 = \frac{1}{8} [3 \nu_{II} + \nu_I].$$

Par ce procédé, la détermination des deux contraintes au centre des cylindres de verre que j'ai utilisés se fait en quelques secondes.

*
**

Les phénomènes successifs qui se passent dans le cylindre de verre encastré dans le ciment sont les suivants :

1° Les contraintes principales au centre du verre sont des pressions qui croissent d'abord proportionnellement au retrait, puis se stabilisent rapidement;

2° Si, à un moment quelconque, soit par immersion, soit par exposition à l'air humide, on diminue le retrait, les contraintes tombent rapidement à zéro, tandis que le retrait ne perd qu'une faible partie de sa valeur;

3° Si on prolonge l'immersion au delà du moment où les contraintes s'annulent, le retrait continue à décroître et le cylindre de verre se trouve tendu;

4° Dans un espace de degré hygrométrique variable, la contrainte du verre varie beaucoup et parallèlement à l'hygrométrie.

Ces quatre points constituent la première phase du phénomène ou phase des contraintes uniformes. Reprenons-les plus en détail.

1° Les contraintes principales au centre du cylindre sont des pressions de valeurs extrêmement diverses. Dans le cas d'une plaque circulaire de ciment avec un cylindre de verre placé au centre, elles sont égales. Toute direction devient direction principale, l'ellipse de LAMÉ en ce point est un cercle. Ce fait se traduit en photoélasticité par l'observation de deux lignes isoclines noires radiales, toujours perpendiculaires entre elles quel que soit l'angle des nicols.

Dans le cas d'une plaque de ciment rectangulaire, les deux contraintes principales sont différentes. Elles sont situées dans les axes de la plaque, la plus petite contrainte se trouvant sur le plus grand axe. Ceci s'explique aisément, l'adaptation du ciment étant plus sensible dans la petite dimension de la plaque.

Ces contraintes croissent d'abord proportionnellement au retrait, puis tendent à se stabiliser. Le coefficient de proportionnalité et la tendance à l'adaptation varient avec divers facteurs dont les plus importants semblent être la nature du ciment et le degré de durcissement.

On peut définir ainsi la contrainte de retrait particulière à chaque ciment. Nous avons vu que le retrait était du même ordre de grandeur pour tous les ciments. La contrainte sera d'autant plus élevée que le coefficient d'élasticité sera lui-même élevé. L'adaptation sera d'autant moindre

que le ciment sera plus résistant et que le retrait se manifestera plus rapidement.

Conséquence. — La contrainte de retrait est maximum avec le ciment fondu et les ciments à hautes résistances initiales, elle décroît pour les artificiels, ciments de laitier, ciments naturels, chaux, plâtre.

Le dernier terme, le plâtre offre une particularité remarquable : pour ce liant, le gonflement de prise est bien supérieur au retrait à l'air : le cylindre de verre est continuellement tendu. Au bout de quelques jours il peut se détacher du plâtre.

2° Si on immerge la plaque ou qu'on l'expose à l'air humide, le ciment s'allonge lentement tandis que la contrainte décroît et s'annule très rapidement. Le phénomène demande quelques heures au plus dans le cas de l'immersion, quelques jours dans le cas de l'exposition à l'air humide.

Sa durée est caractéristique du ciment et du degré de durcissement. A âge égal il a suffi de vingt à trente minutes pour annuler la contrainte dans un portland, dix heures ont été nécessaires pour l'annuler dans un fondu. Pour un même ciment, il a fallu pour l'annuler six heures à deux jours, dix heures à sept jours, vingt heures à un mois. La raison en est probablement la même que pour le retrait : les canaux du ciment sont d'autant plus fins que le durcissement est avancé, et l'eau y circule plus difficilement.

Il existe également un coefficient de proportionnalité au retrait pendant la décroissance mais il est difficile à déterminer d'une part à cause de la rapidité de pénétration de l'eau, d'autre part à cause de la nécessité de sortir la plaque pour examiner le verre à la lumière polarisée.

Inversement, par exposition à l'air, on revient à la longueur et à la contrainte primitives. Le chemin suivi n'est pas le même que le précédent, mais empiète sur lui à la manière des courbes d'hystérésis.

Le fait le plus remarquable de ce retour est l'accroissement avec l'âge du coefficient de proportionnalité contrainte-

retrait. Peu sensible avec les ciments vite évolués, il l'est davantage avec les ciments lents.

Les figures 30 montrent des diagrammes avec immersion tracés pour différents ciments.

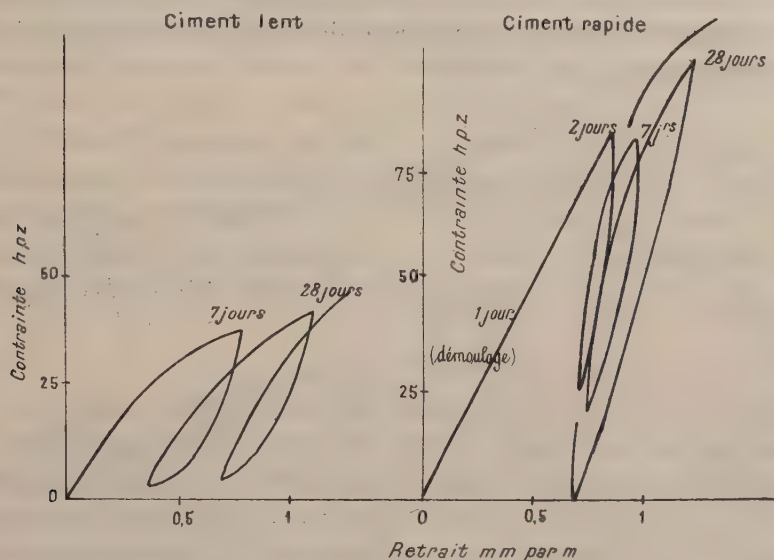


Fig. 30. — Courbes contrainte-retrait. — Mortier 1/1.

3° Dans le cas d'immersions prolongées, la contrainte dans le verre s'inverse, devient une tension mais se stabilise à une faible valeur tandis que le retrait décroît de plus

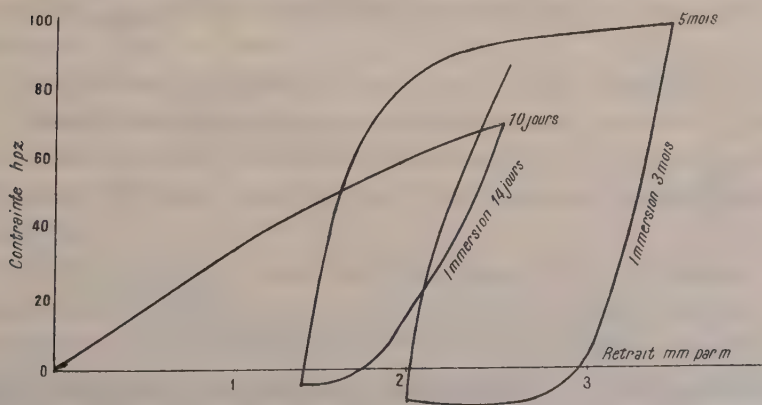


Fig. 31. — Courbes contrainte-retrait. — Ciment pur.

en plus jusqu'à une valeur limite. Tout se passe comme si l'adaptation, dans le cas où le verre est tendu, était beaucoup plus prononcée que dans le cas où il est comprimé par le ciment. Dans le diagramme contrainte-retrait, le point représentatif tend à revenir vers l'origine. Par immersions et émergences successives on trace des boucles plus ou moins prononcées (fig. 31).

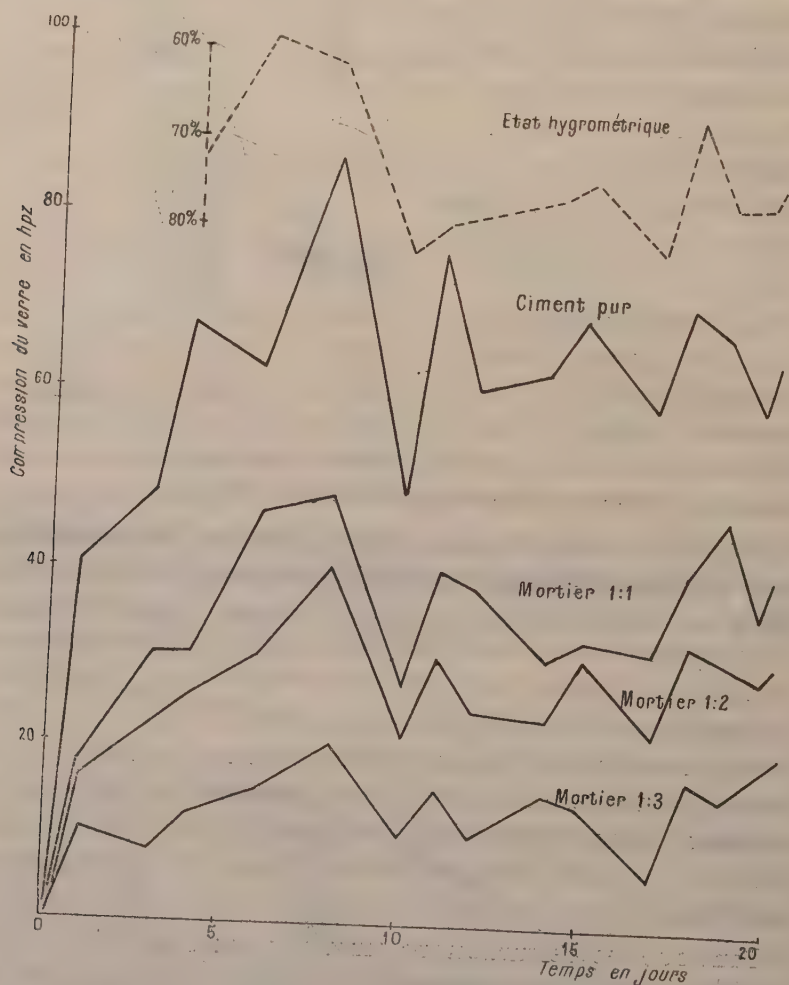


Fig. 32. — Variations hygrométriques des contraintes.

Conséquence. — L'expérience montre qu'il ne saurait subsister de contraintes de retrait après une immersion suffisam-

ment prolongée. Or on sait que la résistance d'un béton, comme son adhérence au fer, est plus grande dans le cas de la conservation à l'eau que dans le cas de la conservation à l'air. Il faut donc admettre que ces qualités ne sont pas dues uniquement au retrait.

En particulier l'adhérence semble liée à l'affinité des surfaces de contact. Comme on le constate par photoélasticité, elle est considérable dans le cas verre-ciment.

4° Dans un espace de degré hygrométrique variable la contrainte du verre varie constamment, dans de grandes proportions, et parallèlement à l'hygrométrie ambiante. Ce parallélisme est remarquable. L'ensemble verre-ciment se révèle comme un hygromètre des plus sensibles (fig. 32).

*
**

La phase des contraintes uniformes peut durer plus ou moins longtemps suivant la nature du ciment, le degré de dessiccation, etc. Au bout d'un temps variable (de quelques heures à quelques jours pour les ciments fondus, et à hautes résistances initiales, de quelques jours à quelques mois pour certains portlands) des irrégularités naissent dans la répartition des contraintes. Des points singuliers apparaissent à la périphérie du verre et se déplacent peu à peu vers le centre.

Ces points singuliers se révèlent par des taches noires en lumière polarisée circulaire (observation des isochromatiques).

En lumière rectiligne, on constate que les isoclines cessent d'être des droites radiales et deviennent des courbes de plus en plus compliquées. Par rotation des nicols, ces courbes balayent le verre, mais passent constamment par les points singuliers.

Tant que les perturbations ainsi apportées sont faibles, on peut encore obtenir les contraintes principales au centre du verre, par les formules de M. TESAR. Quand elles deviennent importantes, il est nécessaire de passer à l'étude générale par les isostatiques et isochromatiques.

Sur les petits modèles de verre utilisés, les isoclines se déterminent facilement. On en déduit les isostatiques avec suffisamment de précision (fig. 33). Mais pour obtenir les courbes de valeurs, il est nécessaire d'opérer sur des modèles plus grands.

On constate ainsi qu'en certains points de la périphérie du verre, en général dans la région des points singuliers, il existe des tensions. Il semble que ces tensions puissent aller jusqu'à provoquer la rupture du verre. J'ai observé un tel phénomène dans une plaque d'un bon ciment artificiel pur. Au bout de sept mois, une amorce de fêlure radiale s'est révélée en un point du pourtour du verre, et a progressé lentement pendant huit jours. Au bout de ce temps elle avait gagné le trou central. Puis la plaque de ciment s'est fissurée à son tour, à peu près dans le prolongement de la fêlure du verre.

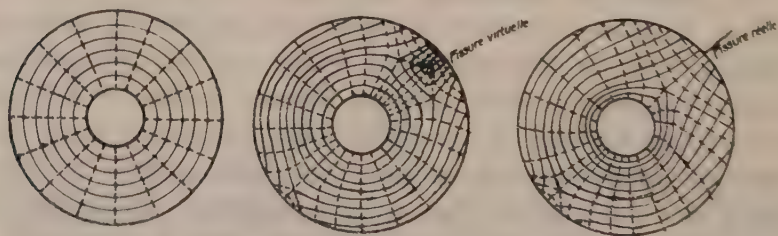


Fig. 33. — Isostatiques dans un cylindre de verre soumis à l'action du retrait du ciment.

J'ai appelé cette période phase des fissures virtuelles, attribuant les perturbations dans les contraintes à des défaillances locales du ciment. En particulier, on expliquerait ainsi l'apparition de tensions considérables en certains points du verre. Considérons (fig. 30) un cylindre de verre entouré de ciment. Le retrait a pour effet de comprimer radialement le verre et de tendre tangentiellement le cylindre. Il existe d'autre part une adhérence considérable entre ces matériaux. Cela étant, si le ciment cède suivant $a b$ par exemple la totalité des efforts de tension qu'il supportait se trouve transmise au verre au point a .

Par la suite l'adhérence tangentielle verre-ciment se trouve détruite sur une longueur plus ou moins grande. Une partie

des efforts de tension se trouve reportée sur le ciment qui cède : c'est la phase des fissures réelles. La fissure semble naître sur le bord du verre pour se propager plus ou moins vite. Il peut s'en développer simultanément plusieurs amorces; on s'en rend compte au début de l'immersion : quelques fissures radiales s'accusent par la coloration plus foncée due à la pénétration immédiate de l'eau.

A ce moment la répartition des efforts change plus ou moins vite. La partie voisine de la fissure est tendue, la partie opposée comprimée. Le verre tend à s'ouvrir comme sous l'action d'un coin. Au cours d'autres expériences j'ai constaté également l'apparition de fêlures de verre pendant cette période.

ÉTUDE DES CONTRAINTES EN PROFONDEUR.

On peut se demander quelles sont, au point de vue contrainte, les parties les plus actives du ciment, les couches extérieures en contact direct avec l'air ou les couches centrales qui prennent tardivement leur retrait? En d'autres termes, comment se répartissent les contraintes dans la profondeur d'un bloc de ciment?

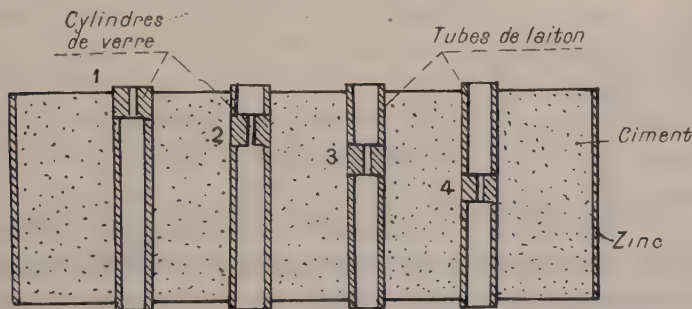


Fig. 34. — Éprouvettes servant à déterminer les contraintes en profondeur.

Pour obtenir qualitativement cette répartition, j'ai moulé un bloc de $10 \times 10 \times 20$ centimètres. Afin de réaliser le cas d'une dalle indéfinie, en contact avec l'air seulement par les faces opposées, j'ai enduit ce bloc sur quatre faces d'une couche de bitume elle-même recouverte d'une plaque de

zinc. Quatre armatures traversaient le bloc, constituées chacune par deux tubes de laiton de 16 millimètres de diamètre mis bout à bout, mais séparés par une pastille de verre à une profondeur variable dans le ciment. L'ensemble est représenté par la figure 34. Les quatre cylindres de verre s'échelonnaient de la couche centrale à la couche supérieure.

J'ai effectué l'expérience pour un ciment pur et un mortier, les résultats ont été les mêmes :

1° Le verre placé à la surface est légèrement comprimé le premier et le deuxième jours, la compression semble disparaître par la suite;

2° Les deuxième, troisième et quatrième verres se trouvent comprimés de plus en plus tard et à un taux d'autant plus fort qu'ils sont placés profondément.

Finalement, le cylindre le plus comprimé est celui du centre.

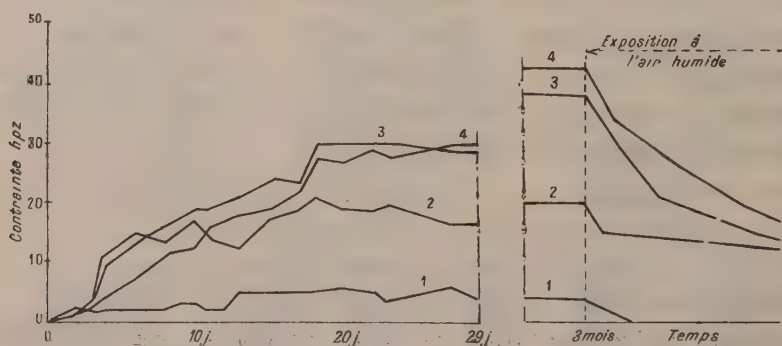


Fig. 35. — Variations des contraintes en profondeur. — Mortier 1/1.

3° Une exposition à l'air humide fait décroître lentement les contraintes. Le retour à l'air sec ramène peu à peu, et dans le même ordre, les contraintes primitives.

Ces résultats sont exprimés graphiquement par la figure 35.

En résumé, il semble que les couches périphériques n'exercent pas de compression sur les corps qui traversent le ciment de part en part. Les couches internes exercent des pressions d'autant plus fortes et d'autant plus tardives qu'elles sont éloignées de la surface.

L'essai ci-dessus fait intervenir trois coefficients d'élasticité, ceux du ciment, du verre, du laiton, dans des conditions difficiles à déterminer. Il ne peut avoir qu'une valeur qualitative.

PHÉNOMÈNES DANS LES MORTIERS.

Dans les mortiers les mêmes phénomènes se retrouvent avec des ordres de grandeur atténués.

Toutefois, la sensibilité aux variations hygrométriques demeure très grande même aux faibles dosages (fig. 32).

Les points singuliers des fissures virtuelles se manifestent plus ou moins vite, on en voit parfois apparaître cinq ou six, mais il peut se passer plusieurs mois sans que leur aspect se modifie.

ÉTUDE DES CONTRAINTES DE SURFACE.

Procédé des miroirs.

Il est possible d'avoir une idée des phénomènes en surface par l'utilisation de petits miroirs circulaires qu'on encastre à la partie supérieure du ciment. Ce procédé est dérivé de celui de M. MABBOUX qui l'utilisa pour mesurer et étudier les efforts supportés par une construction de béton.

Il en diffère essentiellement par le fait que le miroir au lieu d'être plein est percé d'un trou créant un contour libre. On peut ainsi mesurer les deux contraintes en chaque point alors que les pastilles initiales de M. MABBOUX ne permettent de déterminer que la différence des contraintes principales et éliminent par conséquent l'influence du retrait.

Par ce procédé j'ai vérifié qualitativement les phénomènes déjà cités : adaptation et variations des contraintes.

II. ÉTUDE DES CONTRAINTES LONGITUDINALES.

L'étude se fait en suivant parallèlement le retrait d'une éprouvette de mortier non armé et la diminution de longueur d'une armature contenue dans une éprouvette de même forme. La contrainte dans l'armature se déduit de cette diminution par la loi d'élasticité.

Cette méthode a été exposée par M. L. SUQUET qui l'a appliquée en 1931 à l'étude d'une poutre en béton armé. Pour mesurer avec précision la longueur des fers, il a imaginé le procédé des armatures creuses (1) que j'ai repris dans l'étude des petites éprouvettes. Dans celles-ci, l'armature est constituée par un tube de métal (diamètre extérieur 10 millimètres, intérieur 5 millimètres, longueur 400 millimètres). Il contient une tige ronde de 5 millimètres fixée par une goupille à une de ses extrémités. De cette façon, les extrémités libres du tube et de la tige se déplacent l'une par rapport à l'autre de la contraction que subit le tube par suite du retrait. On mesure ce déplacement soit au palmer, soit au microscope, soit à l'aide d'un comparateur. J'ai utilisé cette dernière méthode en fixant au tube un comparateur à aiguille dont le palpeur s'appuie sur la tige. On suit ainsi les variations de longueur avec une grande fidélité et une précision de l'ordre de 2/1.000 de millimètres (2 microns) [fig. 36].

Avec un comparateur spécial il serait même possible par cette méthode d'obtenir une précision de 1/2 micron, précision pouvant être intéressante dans certains cas particuliers.

Cette mesure élimine automatiquement les variations de température, la tige et le tube ayant même coefficient de dilatation. Au contraire, pour étudier l'action de la température sur les longueurs, on utilise des tiges intérieures d'Invar.

La longueur des prismes non armés se mesure par un procédé analogue, en remplaçant le tube de fer par un tuyau de caoutchouc qui suit parfaitement les variations de longueur du ciment (fig. 36).

Par suite de l'apparition rapide des fissures, l'expérience ne peut plus porter sur les ciments purs. Les résultats ci-dessous ont été obtenus sur des mortiers 1/1 de divers ciments gâchés à consistance plastique, démoulés après 24 heures et conservés dans une salle du laboratoire à une température de 18 à 20°, hygrométrie 60 p. 100 environ.

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, 1932, tome III, page 337.

En fonction du temps, le retrait de la pièce libre se traduit par une courbe du genre de celles que nous avons déjà vues, la diminution de longueur de l'armature par une courbe de valeurs beaucoup plus basses qui semblent se stabiliser rapidement.

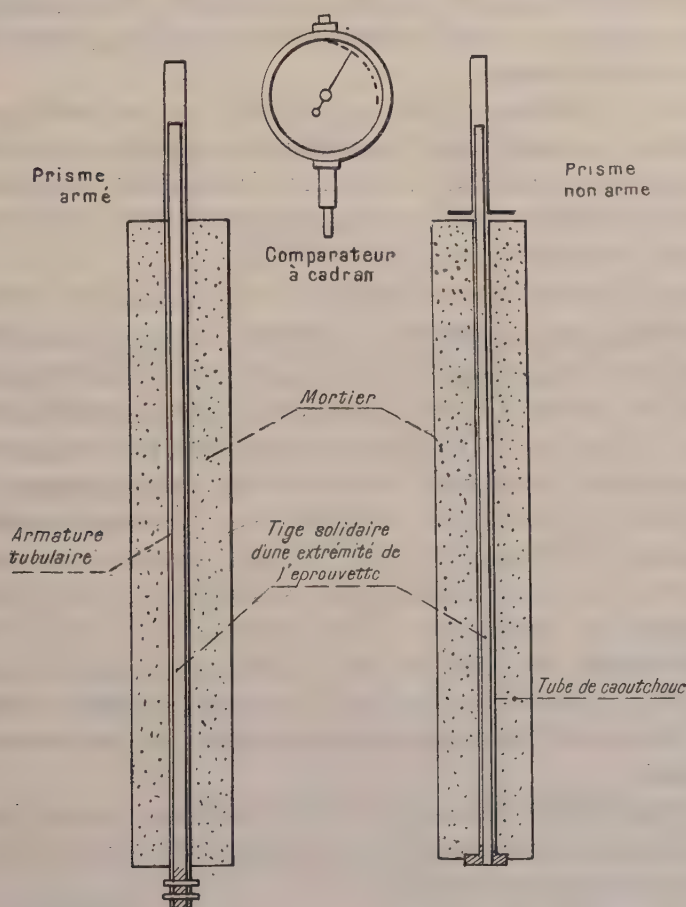


Fig. 36. — Mesure du retrait par le procédé des armatures creuses.

Une immersion fait tomber peu à peu le retrait de la pièce libre à une certaine fraction de sa valeur sans jamais l'annuler. Au contraire, elle fait tomber rapidement à zéro le retrait de l'armature et, si on prolonge l'expérience, elle la met en tension.

Au retour à l'air sec, les contraintes reprennent peu à peu leurs valeurs.

Les courbes obtenues ne sont pas régulières mais suivent fidèlement les variations hygrométriques de l'air. A l'opposé de ce qui a lieu pour le retrait, les variations dues à l'hygrométrie semblent de même ordre pour les deux prismes; dans certains cas, elles paraissent même plus prononcées pour le prisme armé.

Mais si en éliminant le temps on porte sur un même graphique la contrainte dans l'armature en fonction du retrait du ciment non armé on obtient un diagramme contrainte-retrait qui conduit aux mêmes conclusions que celui tracé plus haut à l'aide de la photo-élasticité :

1° La contrainte dans l'armature croît d'abord proportionnellement au retrait de la pièce libre puis se stabilise;

2° En cas d'immersion la contrainte décroît et s'annule rapidement tandis que le retrait ne perd qu'une partie de sa valeur. Si l'on prolonge l'immersion au delà du moment où les contraintes s'annulent, l'armature se trouve tendue;

3° Dans une atmosphère de degré hygrométrique variable, les longueurs du ciment et de l'armature varient constamment. Dans ces variations rapides, il ne semble pas y avoir adaptation. On peut dire, que l'amplitude des variations hygrométriques du ciment non armé et du ciment armé sont égales, mais dans le premier cas elle ne constitue qu'une partie du retrait alors que dans le second elle en constitue la totalité.

Les diagrammes d'adaptation ainsi obtenus varient énormément suivant les conditions dans lesquelles on les trace :

Dimension des éprouvettes;

Pourcentage des armatures;

Hygrométrie de l'air;

Nature des corps en présence.

Les figures 37 et 38 montrent quelques diagrammes tracés dans le cas d'armatures de fer au pourcentage de 2,3 p. 100. Dans le cas d'armatures faibles, le retrait du ciment est à peine contrarié, la courbe se rapproche de la droite limite

à 45°. Dans ce cas le retrait du ciment armé cesse d'être réversible : l'adaptation est incomplète.

J'ai retrouvé également ce fait en mesurant le retrait de plaques de mortier à 450 kilogrammes de ciment par mètre cube de sable (dosage courant). Un pourcentage de 0,5 p. 100 d'armatures de fer de divers types ne modifie pas le retrait de façon appréciable.

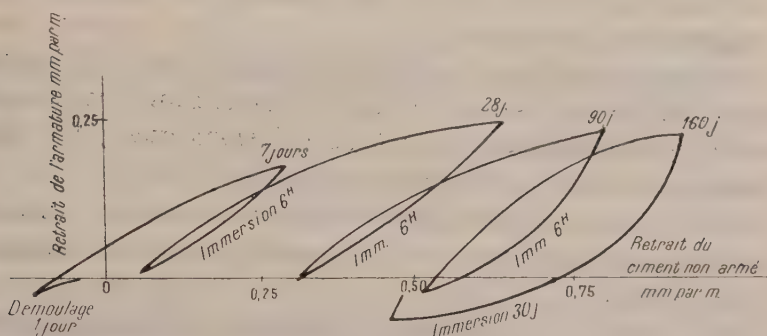


Fig. 37. — Diagramme contrainte-retrait. — Ciment lent.

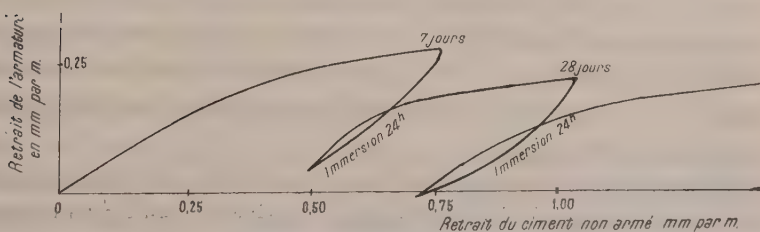


Fig. 38. — Diagramme contrainte-retrait. — Ciment rapide.

PHÉNOMÈNES AVANT DÉCOFFRAGE.

La méthode ci-dessus permet aisément les mesures avant décoffrage.

Nous avons vu les phénomènes successifs qui se produisent dans le cas du ciment non armé.

- 1° Affaissement plastique;
- 2° Gonflement;
- 3° Retrait.

Seuls les deux derniers ont une influence sur l'armature qui subit un allongement assez faible puis un retrait.

CONCLUSIONS.

Les variations de longueur que subit un ciment après sa prise sont :

D'une part, un allongement dû aux modifications internes et dont la valeur moyenne à 3 mois est 1 millimètre par mètre, à 2 ans 2 millimètre par mètre;

D'autre part, un retrait proprement dit variable avec l'hygrométrie ambiante.

Ce retrait, qui s'est trouvé du même ordre de grandeur pour les ciments étudiés, est une fonction linéaire de l'hygrométrie dans l'intervalle 100 à 60 p. 100; au delà, le retrait continue à croître pour les ciments durcis et tend à se stabiliser pour les ciments non durcis. Le retrait est d'autant plus réversible qu'il avait été obtenu dans un état hygrométrique faible.

Les courbes caractéristiques hygrométrie-retrait varient suivant le moment auquel on expose le ciment à l'air. En opérant sur des éprouvettes de plus en plus âgées on trace des courbes qui partent de l'origine avec des coefficients angulaires de plus en plus faibles. La stabilisation du retrait aux basses hygrométries semble disparaître; en même temps la réversibilité croît.

La limite de ces courbes dans le temps est la courbe de variation hygrométrique des ciments durcis, qu'on peut aussi tracer en exposant une seule éprouvette à différentes hygrométries.

Cette courbe définit pour chaque point un coefficient de dilatation hygrométrique moyen, qui a été trouvé de l'ordre de 20×10^{-6} pour un portland entre 60 et 100 p. 100 et d'un ordre beaucoup plus élevé au-dessous de 60 p. 100.

*
**

Enfin lorsque le retrait est contrarié par la présence d'un corps dans la masse du ciment, il se développe de part et d'autre des contraintes importantes qui donnent lieu de la part du ciment à une adaptation prononcée. Elles disparaissent

sent rapidement et peuvent même s'inverser au cours d'une immersion.

Ce travail a été fait au Laboratoire de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, sous la haute direction de M. H. BÉGHIN, Professeur en Sorbonne, et de M. L. SUQUET, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées.

BIBLIOGRAPHIE.

J. BIED. — Recherches industrielles sur les chaux, ciments et mortiers (Dunod).

Bureau anglais de recherches sur les Bâtiments, rapport 1931.

M. CHAPMAN. — Proceed. Amer. Soc. Test. Mat. 24, 767, 1925.

J. COCAGNE et MATRAS. — Revue *Le Ciment*, 33, 232, 1928.

M. COYNE. — Rapport au Congrès des Grands Barrages Stockholm, 1933.

R. DUTRON. — Communication à l'Association belge pour l'essai des matériaux, 21 juin 1933.

E. FREYSSINET. — Une révolution dans les techniques du béton, 1936 (Librairie de l'Enseignement technique).

O. GRAF. — *Beton Und Eisen*, n° 7, 1934.

E. V. MEYER. — Rapport au Congrès de Zurich, 1930.

E. MARCOTTE. — Les Liants, 1929 (Gauthiers Villars).

L. SUQUET. — *Annales des Ponts et Chaussées*, 1932, tome III, p. 337.

D. WERNER ETS. GIERTZ-HEDSTROM. — *Engineer*, 2 mars 1934.

M. ZSIGMONDY. — Traité de chimie colloïdale.

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
Introduction	7
Historique sommaire	9
Méthodes et instruments de mesure. — Précision.....	11
<i>Développement du retrait dans le temps et pour différentes hygro-</i> <i>métries</i>	15
Phénomène sur les ciments jeunes.....	20
Phénomènes sur les ciments durcis.....	26
Réversibilité et irréversibilité du retrait.....	32
Cas particulier : ciment durcissant dans un espace clos.....	33
<i>Variations hygrométriques du retrait et du poids</i>	36
Ciments conservés à l'air libre.....	44
Influence de facteurs secondaires sur le retrait nature du liant, dosage, agents chimiques.....	46
<i>Effet mécanique du retrait des ciments</i>	49
Contraintes transversales	50
Contraintes longitudinales	61
Conclusion	66
Bibliographie	67

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

APPLICATIONS DU THÉORÈME DE CASTIGLIANO
À LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX.

Vu et APPROUVÉ :

Paris, le 1^{er} mars 1937.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

Vu et PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie
de Paris,*

S. CHARLÉTY.

